

Statistische Untersuchungen
zur Bildcodierung
nach dem Überlagerungsprinzip
mit momentaner Prioritätszuteilung

Dem Fachbereich Ingenieurwissenschaften der
Universität Erlangen - Nürnberg
zur Erlangung des Grades
DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Friedrich Oehme
Erlangen, 1975

1975 12 3 55

**Statistische Untersuchungen
zur Bildcodierung
nach dem Überlagerungsprinzip
mit momentaner Prioritätszuteilung**

**Dem Fachbereich Ingenieurwissenschaften der
Universität Erlangen - Nürnberg
zur Erlangung des Grades
DOKTOR-INGENIEUR**

**vorgelegt von
Friedrich Oehme
Erlangen, 1975**



Als Dissertation genehmigt vom
Fachbereich Ingenieurwissenschaften
der Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 24. Juni 1975

Tag der Promotion: 13. Oktober 1975

Dekan: Prof. Dr. rer.nat. H.-J. Schneider

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. D. Seitzer

Prof. Dr.-Ing. W. Schüßler

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Stand der Technik und eigener Beitrag	1
1.1 Einführung	1
1.2 Stand der Technik	5
1.2.1 Zeitmultiplex-Codierverfahren für Sprache und Bilder	5
1.2.2 Bildcodierung ohne Quellenüberlagerung	11
1.3 Neue Beiträge	12
2 Eingabe der Bilder in den Rechner	14
2.1 Die opto-elektronische Bildabtastung - Überblick und Auswahl des Verfahrens	14
2.2 Anpassung der Datenrate der Kamera an den Rechner	17
2.3 Der Störabstand des quantisierten Bildes	23
2.4 Der Vorgang der Abtastung und Speicherung eines Bildes	28
3 Die statistischen Eigenschaften der Bildquelle	32
3.1 Überblick über das Bildmaterial, Auswahl der Quantisierung	32
3.2 Analyse der Kettenstruktur des Bildquellen- signals	38
3.3 Die statistische Erfassung von Kontrast- und Detailzonen	42
3.4 Die Häufigkeit von Mehrfachbelegungen	45
4 Ein mathematisches Modell für die Bildüberlagerung	51
4.1 Das Prinzip der Berechnung der Fehlervertei- lung	51
4.2 Berechnung der Differenzverteilung im Überlagerungsbild	54
4.3 Berücksichtigung der örtlichen Häufung großer Differenzen in den Kontrastzonen	58
4.4 Die Fehlerrückkopplung	62
4.5 Vergleich von Modellrechnung und Simulation	65

	Seite
5 Die Wirksamkeit der Bildüberlagerung als wirtschaftliche Quellencodierung	69
5.1 Die statistische Wirksamkeit des Überlagerungsprinzips	71
5.2 Diskussion der Fehler durch Mehrfachbelegungen	75
5.3 Abschätzung der Leistungsfähigkeit des MPZ-Verfahrens auf der Grundlage der statistischen Ergebnisse	85
6 Zusammenfassung und Schlußbemerkung	92
7 Literatur	94
Anhang	97

1 Stand der Technik und eigener Beitrag

1.1 Einführung

Die wirtschaftliche Quellencodierung dient der Einsparung von Kapazität bei der Übertragung und Speicherung von Nachrichten. Neben der Kapazitätseinsparung ist der benötigte Geräteaufwand ein Kriterium für die Wirtschaftlichkeit eines Codierverfahrens. Er steigt im allgemeinen progressiv an mit zunehmender Annäherung des mittleren Codeaufwandes an den mittleren Informationsgehalt des Quellensignals.

In dieser Arbeit wird ein Quellencodierverfahren für die Übertragung von Bildern untersucht. Bild 1.1 zeigt das Blockschaltbild der Übertragungskette.

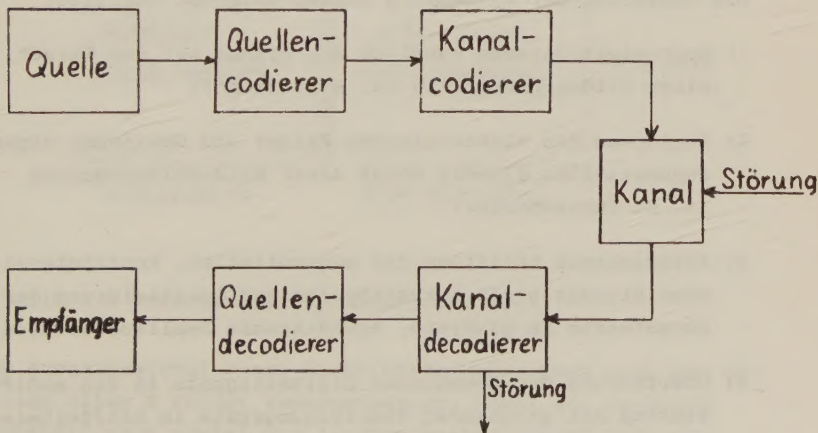


Bild 1.1 Blocksaltbild des Nachrichtenübertragungssystems

Im Verlauf der Quellencodierung wird aus dem optischen Bild diejenige Folge von Binärzeichen gewonnen, welche die Rekonstruktion des Bildes durch den Quellendecodierer beim Empfänger ermöglicht. Da die Quellencodierung keine Rücksicht auf die Eigenschaften des Kanals, insbesondere auf Störungen, nimmt, müssen ein Kanalcodierer und ein Kanaldecodierer vorgesehen werden, deren Aufgabe darin besteht, die vom Quellencodierer übernommenen Nachrichten möglichst unverfälscht an den Quellendecodierer abzugeben.

Shannon [1] hat bewiesen, daß dies im Grenzfall idealer Kanalcodierung bei von Null verschiedener Kanalkapazität möglich ist. In der vorliegenden Arbeit wird das Problem der Kanalcodierung nicht behandelt. Die Betrachtungen beziehen sich auf die Quellencodierung ohne Rücksicht auf etwaige vom Kanaldecodierer nicht eliminierte Signalstörungen vom Übertragungskanal.

Die Codierung der Bildquelle umfaßt folgende Schritte:

- 1) Opto-elektronische Wandlung des Bildes auf dem Target einer Bildaufnahmeröhre (z. B. Vidikon);
- 2) Zerlegung des elektronischen Bildes und Gewinnung eines sequentiellen Signals gemäß einer Bildzerlegungsnorm (z. B. Fernsehnorm);
- 3) Zeitdiskrete Abtastung des sequentiellen, kontinuierlichen Signals gemäß Abtasttheorem und Quantisierung der Abtastwerte in diskrete, äquidistante Amplitudenstufen;
- 4) Überführung des gewonnenen Digitalsignals in ein modifiziertes mit geringerer Übertragungsrate in bit/Zeiteinheit unter Einhaltung eines Gütekriteriums für die Originaltreue der Reproduktion beim Empfänger.

Genau betrachtet liegt nicht nur Schritt 4), sondern auch den Schritten 1) - 3) ein Gütekriterium zugrunde, d. h. auch diese Schritte beeinträchtigen die Originaltreue der Reproduktion. Wird diese Beeinträchtigung vom Empfänger - im Falle der Bilder dem menschlichen Betrachter - nicht oder nicht störend wahrgenommen, so bezeichnet man die unterdrückten Bestandteile der Nachricht als irrelevant. Bild 1.2 zeigt dazu die Darstellung der Nachrichtenebene nach Shouten [2].

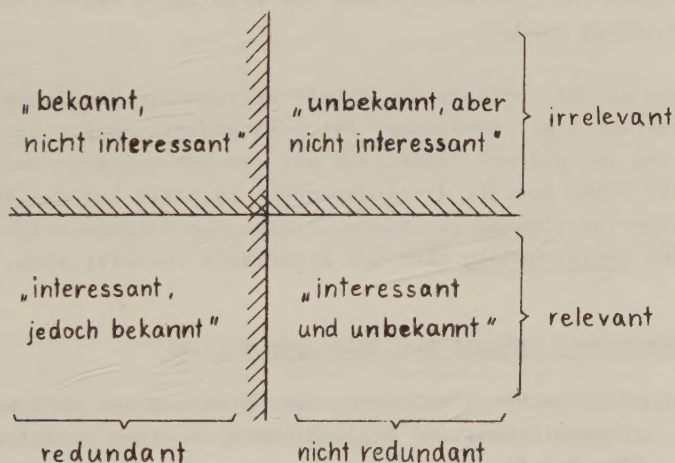


Bild 1.2 Die Nachrichtenebene nach [2]

Das Ausgangssignal einer Nachrichtenquelle kann sich aus Anteilen aller 4 Felder zusammensetzen, wobei der Ausdruck "bekannt" auch soviel wie "sicher vorhersagbar" bedeutet. Die Grenze zwischen "relevant" und "irrelevant" wird durch das erwähnte Gütekriterium gezogen. Beispiele für irrelevanten Nachrichten sind die Verfeinerung der Zerlegung eines

Fernsehbildes auf unendlich viele Zeilen oder die weitere Verfeinerung einer dem Betrachter als stufenlos erscheinenden Grautreppe.

Die Aufgabe der Quellencodierung besteht somit in der Elimination aller Bestandteile einer Nachricht, welche in den durch Schraffur gekennzeichneten Feldern liegen. Im Falle der Bildcodierung wird ein Teil dieser Aufgabe durch die Schritte 1) bis 3), elektronische Erfassung und Digitalisierung des Bildes, erledigt, wobei es sich um die Beseitigung von gleichmäßig über die Bildfläche verteilter Irrelevanz handelt.

Das in der vorliegenden Arbeit untersuchte Überlagerungsverfahren mit momentaner Prioritätszuteilung für die Codierung von Bildern (identisch mit dem MPZ-Verfahren nach [12]) ist unter Schritt 4) einzuordnen. Es zielt auf die Elimination von redundanten Bestandteilen der Bild-Nachricht, welche ungleichmäßig über die Bildfläche verteilt sind.

Die Arbeit besteht aus folgenden Teilen:

- 1) Aufbau einer Einrichtung zur Abtastung von Bildvorlagen (Diapositiven) und deren Eingabe in einen Prozeßrechner (Kapitel 2).
- 2) Untersuchung der statistischen Eigenschaften der Bildquelle, soweit sie für das Überlagerungsprinzip von Bedeutung sind (Kapitel 3).
- 3) Entwicklung eines mathematischen Modells zur theoretischen Berechnung der Bildpunkt-Fehler-Verteilung des Überlagerungsverfahrens mit momentaner Prioritätszuteilung (Kapitel 4).
- 4) Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Kapazitätseinsparung und Fehlerleistung beim MPZ-Verfahren (Kapitel 5).

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Zeitmultiplex-Codierverfahren für Sprache und Bilder

Allen hier referierten Zeitmultiplexverfahren ist es gemeinsam, daß die Kapazität des Übertragungskanals den Nachrichtenquellen nicht nach einem starren Schema zugewiesen wird, sondern nach dem individuellen Übertragungsbedarf der jeweiligen Quelle.

Das TASI-Verfahren [3] wird für die Sprachübertragung über Transatlantikkabel eingesetzt. Der Sprechweg einer Verbindung wird jeweils dann durchgeschaltet, wenn der Sprachdetektor einsetzende Sprache des betreffenden Teilnehmers feststellt. Er wird wieder aufgetrennt, wenn nach Abklingen der Sprache eine gewisse Zeit vergangen ist. Damit ist es möglich, mit 36 Sprechwegen 72 Verbindungen aufrecht zu erhalten.

Ein ähnliches Verfahren mit feinerer Zeitauflösung, nämlich mit einer Durchschaltung für jeden Abtastwert, ist das im einzelnen später behandelte MPZ-Verfahren. Es wurde für Bilder entwickelt [8] und ist für Sprache in Untersuchung [4]. Eine Alternative dazu ist das PWA-Verfahren [5], welche die beim MPZ-Verfahren benötigte Adressencodierung umgeht. Die Kapazität eines Übertragungsrahmens wird hier prädiktionsgesteuert auf die einzelnen Quellen verteilt.

Von Acs und Hutter [6] wurde ein lagemoduliertes Adresscodeverfahren für die Zeitmultiplexübertragung von Sprache entwickelt. Im Übertragungsrahmen wird jeder Bitposition ein Sprach-Amplitudenwert zugeordnet. Hat die Verbindung k den Abtastwert der Größe X zu übertragen, so wird im Übertragungsrahmen an der Bitposition X die Adresse k vermerkt.

Ein weiterer Abtastwert der Größe X kann in diesem Übertragungsrahmen nicht übertragen werden und muß daher verzögert werden. Der Effekt dieses Verfahrens besteht darin, daß die Übertragungseinrichtung durch Verkehrsspitzen nicht blockiert wird, sondern daß nur die Störung der übertragenen Sprache zunimmt.

Huang und Tretiak [7] haben ein Verfahren der pseudozufälligen Übertragung von Faksimile-Vorlagen angegeben. Dazu werden die Bildpunkte der Vorlage nicht zeilenweise abgetastet sondern gemäß einer pseudozufälligen Punktfolge. Für jedes Paar Quelle-Empfänger wird eine individuelle Pseudo-Zufallsfolge benutzt. Die Vorlagen tragen weiße Schrift auf schwarzem Untergrund. Das Überlagerungssignal wird aus der Vereinigung der weiß-Signale aller Quellen gebildet. Je nachdem, mit welcher Pseudozufallsfolge das Überlagerungsbild dargestellt wird, erscheint die Schrift der betreffenden Quelle weiß auf schwarzem Untergrund. Die Weißpunkte der anderen Quellen erscheinen als pseudozufällig über die Bildfläche verteiltes Störsignal. Das Verfahren benötigt keine Adressencodierung, für Grautonbilder ist es nicht geeignet.

Seitzer, Closs und Stucki [8,9] haben unabhängig von [7] erstmals das in der vorliegenden Arbeit untersuchte Multiplexverfahren mit Adreßcodierung beschrieben und Ergebnisse seiner Anwendung auf Faksimile-Vorlagen angegeben. Das Prinzip wird an Bild 1.3 erläutert. Die Bilder 1 ... n werden auf der Senderseite synchron abgetastet. Auf der Empfängerseite laufen n Wiedergabegeräte ebenfalls synchron. Zwischen ihnen und den Sender-Abtastern besteht die Vereinbarung, daß solange weiße Bildpunkte reproduziert werden, wie keine Nachricht vom Sender ankommt. Kommt eine Nachricht an, so bedeutet dies die Reproduktion eines schwarzen Bildpunktes. Die Nachricht für den Empfänger besteht also aus

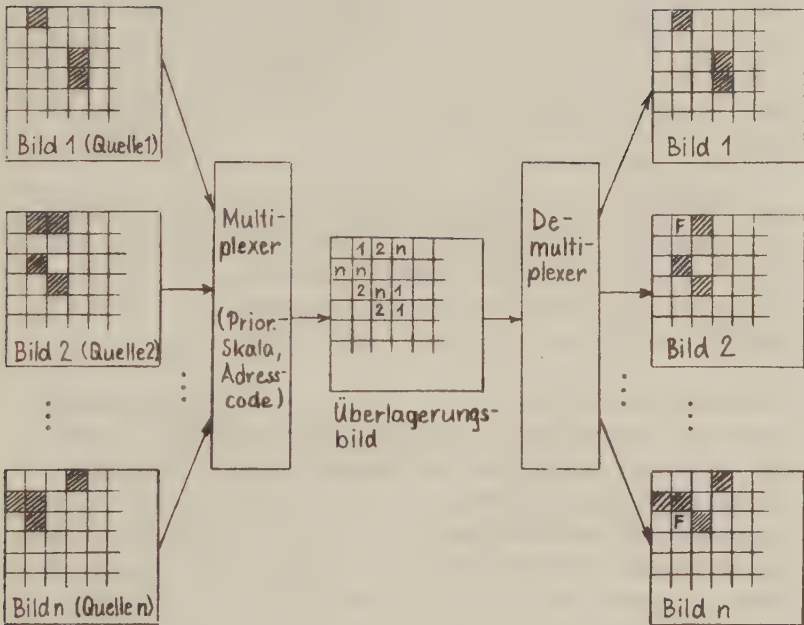


Bild 1.3 Prinzip des Bildmultiplexverfahrens

einem Bit. Der Demultiplexer benötigt jedoch die Adresse des Empfängers, d. h. auf dem Kanal wird pro Bildpunkt eine Empfängeradresse bzw. das Kennwort für Leerlauf übertragen. Treffen auf der Senderseite gleichzeitig mehrere solche 1-bit-Nachrichten, d. h. Übertragungsanforderungen am Multiplexereingang zusammen, so kann nur eine davon berück-

sichtigt werden. Die Auswahl erfolgt aufgrund einer momentanen Prioritätszuordnung. Für die nicht berücksichtigten Quellen bedeutet das, daß beim Empfänger die eigentlich fällige Nachricht nicht ankommt, und daß dieser anstelle des senderseitig abgetasteten Schwarzpunktes einen Weißpunkt und somit einen Bildpunktfehler erzeugt. In Bild 1.3 sind zwei solche Fälle dargestellt und im Empfängerbild mit F markiert. Die Prioritätszuordnung erfolgt pseudozufällig.

Man erkennt, daß das Multiplexverfahren durch die Übertragung eines Überlagerungsbildes, dessen Bildpunkte die Adressen der Empfänger bzw. das Leerlauf-Kennwort sind, beschrieben werden kann. Bei dieser Betrachtungsweise wird die Einsparung von Kanalkapazität besonders deutlich.

Die von Seitzer, Closs und Stucki in [9] veröffentlichten Ergebnisse wurden durch Rechnersimulation gewonnen. Es ergibt sich gute Lesbarkeit von Textvorlagen bei Anwendung des Verfahrens mit 8 Quellen. Es wird außerdem gezeigt, daß die Anzahl der bei der Überlagerung gleichzeitig eintreffenden Übertragungsanforderungen hinreichend genau durch eine Binomialverteilung $B(p, N, n)$ (p = mittlerer Schwarzanteil der Vorlage, N = Anzahl Quellen, n = Anzahl gleichzeitiger Übertragungsanforderungen) beschrieben werden kann. Dies erlaubt die Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Bildpunktfehlern. Aufgrund subjektiver Beurteilung von Vorlagen nach simulierter Überlagerung wird die empirische Formel

$$N = 1/p$$

für die Anzahl N zu überlagernder Quellen vom mittleren Schwärzungsgrad p bei annehmbarer Qualität gefunden. Mit $p = 0,12$ (Schreibmaschinentext) und $N = 7$ ergibt sich dabei eine Schwärzung des Überlagerungsbildes zu 66 %, woraus sich nach einer Zwischenrechnung der Verlust an Schwarzpunkten pro Bildvorlage zu 21,5 % ergibt.

Bei Stucki [10] findet sich neben den bereits in [9] veröffentlichten Untersuchungen mit Faksimile-Vorlagen u. a. der folgende Vorschlag für die Überlagerung von differenz-quantisierten Grautonbildern. Wenn q die Anzahl der im Quantisierer vorgesehenen Differenzstufen ist, dann wird ein Graubild als die Überlagerung von q Teilbildern aufgefaßt, in denen jeweils die Bildpunkte schwarz sind, in denen die betreffende Differenz auftritt. Damit ist die Überlagerung von Grautonbildern auf die Überlagerung von Schwarz-weiß-Bildern in den einzelnen Differenzstufen zurückgeführt. Bild 1.4a) zeigt die Realisierung durch den Übertragungsrahmen pro Bildpunkt für Quantisierung in die Differenzstufen -4, -1, +1, +4. Die Rechnersimulation ergab annehm-

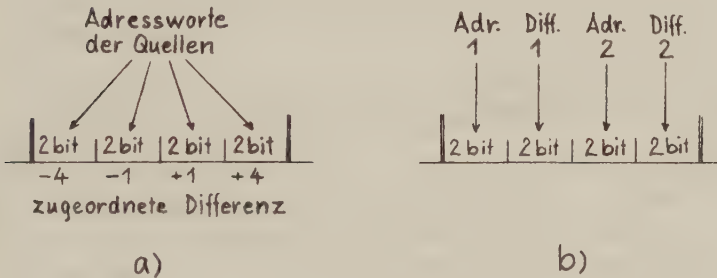


Bild 1.4 Übertragungsrahmen pro Bildpunkt bei Graubild-Überlagerung

- a) positionscodierte Differenzen
- b) direkt codierte Differenzen

bare Reproduktion bei Überlagerung von 4 detailreichen Bildern oder 6 detailarmen Bildern.

Der Vergleich der Aufteilung des Übertragungsrahmens nach [10] gemäß Bild 1.4a) mit dem MPZ-Verfahren [11, 12] anhand

der möglichen Fehlerfälle bei der Überlagerung von 3 Bildern zeigt, daß die Aufteilung b) günstiger ist. Beim Übergang von a) nach b) entstehen zusätzliche Fehler in den relativ seltenen Fällen, daß alle 3 Quellen gleichzeitig unterschiedliche Differenzen übertragen möchten. Dafür verschwinden die Fehler in jenen relativ häufigen Fällen, wo 2 Quellen gleichzeitig die gleiche Differenz übertragen möchten.

Das MPZ-Verfahren wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit untersucht. Die wichtigsten Merkmale des MPZ-Verfahrens sind:

- 1) Eine Nachricht pro Bildpunkt wird nur dann übertragen, wenn gegenüber dem zeitlich vorhergehenden Bildpunkt eine Helligkeitsdifferenz vorhanden ist. Die Nachricht besteht aus Differenz-Codewort und Quellenadresse.
- 2) Bei mehreren gleichzeitigen Übertragungsanforderungen wird die größte Differenz bevorzugt (Prioritätszuteilung).
- 3) Solange der Empfänger keine Nachricht erhält, reproduziert er den Grauton des vorhergehenden Bildpunktes.
- 4) Das MPZ-Verfahren benötigt keinen Pufferspeicher, da nicht auf die Bildpunkte vorhergehender Bildzeilen zurückgegriffen wird. Pro Quelle-Empfänger-Paar werden ein DPCM-Codierer/Decodierer und für mehrere Paare gemeinsam der Multiplexer mit Prioritätssteuerung und der Demultiplexer benötigt.

1.2.2 Bildcodierung ohne Quellenüberlagerung

Am weitesten verbreitet sind zur Zeit die Quellen-Codierverfahren ohne Bildüberlagerung. Diese Verfahren beruhen auf einer möglichst vollständigen Dekorrelation der Bildpunkte, d. h. einer möglichst exakten Elimination der Nachrichtenbestandteile in der linken Nachrichten-Halbebene von Bild

1.2. Das kann auf zweierlei Weise erreicht werden:

- a) Prädiktion des nächsten Bildpunktes aufgrund der Kenntnis der vorhergegangenen Bildpunkte; zu übertragen ist die Korrektur zum Prädiktionswert.
- b) Zerlegung des Bildes teilfeldweise gemäß einem orthogonalen System regelmäßiger Muster im Zuge einer zweidimensionalen Transformation; zu übertragen sind die Koeffizienten der einzelnen Muster.

Durch zweckmäßige Gestaltung der Quantisierungskennlinie (Umschaltung zwischen grober und feiner Quantisierung in Abhängigkeit vom örtlichen Bildinhalt) im Fall a) wird die weitgehende Ausscheidung irrelevanter Nachrichten erreicht. Eine ausführliche Untersuchung dazu findet man bei Kummerow [13]. Es wird eine Einsparung von Kanalkapazität im Verhältnis 8:3 bei exzellenter Bildgüte (256 Graustufen) erzielt. Der Geräteaufwand umfaßt pro Quelle-Empfänger-Paar den Zeilenspeicher für die Prädiktion bei Sender und Empfänger, je einen Prädiktor bei Sender und Empfänger, im allgemeinen 2 DPCM-Codierer/Decodierer, welche umgeschaltet werden, sowie die Detektoren für die Umschaltung.

Durch informationstheoretisch optimale Codierung (Huffman-Code) der Koeffizienten im Fall b) sowie Vernachlässigung sehr kleiner Koeffizienten werden sowohl Redundanz als auch Irrelevanz stark reduziert.

Eine ausführliche Abhandlung über Transformationscodierung von Bildern findet man bei Wintz [14]. Die erzielte Einsparung von Kanalkapazität liegt zwischen 8:2 und 8:1 je nach Anpassung der Koeffizienten-Auswahl an die örtliche Bildstruktur. Der Geräteaufwand pro Quelle-Empfänger-Paar für die Transformationscodierung umfaßt den PCM-Codierer/Decodierer, Speicher in der Größenordnung von 16 Bildzeilen beim Sender und Empfänger sowie Rechenschaltungen zur gleichzeitigen Verarbeitung von bis zu 64 Bildpunkten bei der Ausrechnung der Musterkoeffizienten beim Sender bzw. der Grautöne beim Empfänger.

1.3 Neue Beiträge

In Kapitel 2 wird die aufgebaute Einrichtung zur Bildabtastung und Eingabe in einen Prozeßrechner beschrieben. Zur Abtastung der Bildvorlagen (Diapositive) wird eine Fernsehkamera verwendet. Durch mehrfache Abtastung der Bildvorlage und Mittelung der Abtastwerte pro Bildpunkt wird die dem Bild überlagerte Rauschleistung aus der Kamera auf die Größenordnung des Quantisierungsrauschens bei 256 Helligkeitsstufen reduziert.

In Kapitel 3 wird über statistische Untersuchungen an den abgetasteten und auf 32 Helligkeitsstufen reduzierten Bildern berichtet. Es wird gezeigt, daß die Bildquelle eine gedächtnisbehaftete Nachrichtenquelle ist. Das wird durch folgende statistische Sachverhalte am Differenzsignal (DPCM) nachgewiesen:

1. Die Verteilung der Ketten von Differenzen größer null hat gegenüber der gedächtnislosen Quelle zu große Häufigkeiten bei langen Ketten.
2. Die Verteilungen der Differenzbeträge über der Kettenlänge zeigen, daß in kurzen Ketten keine großen Differenzen vorkommen.

3. Aufeinanderfolgende Differenzen haben häufiger gleiches Vorzeichen als im Falle der Gedächtnislosigkeit.
4. Effektivwert der Differenzen größer null und örtliche¹⁾ Häufigkeit von Differenzen größer null sind korreliert.
5. Die örtliche¹⁾ Häufigkeit von Differenzen größer null schwankt um das mehr als 10-fache im Vergleich zur gedächtnislosen Quelle.

In Kapitel 4 wird auf der Grundlage der statistischen Ergebnisse ein mathematisches Modell für die Berechnung der Fehler bei Bildüberlagerung entwickelt. Das Modell wird durch ein Rechnerprogramm realisiert. Außerdem werden auf dem Rechner Simulationen durchgeführt, welche die Ergebnisse der Modellrechnung bestätigen.

In Kapitel 5 wird der Zusammenhang zwischen Kapazitätseinsparung durch das MPZ-Verfahren und Beeinträchtigung der Bildgüte ermittelt. Dabei stellt sich heraus, daß bei gleicher Fehlerleistung pro Bild durch den Übergang von 1 Kanal auf 2 Kanäle und entsprechend mehr Quellen die Leistungsfähigkeit des MPZ-Verfahrens um 33 % steigt. Eine weitere Erhöhung der Kanalzahl ist weniger wirkungsvoll.

Das Problem der Übertragung mehrerer unregelmäßiger Nachrichtenflüsse über einen gemeinsamen Kanal ist den in der Fernsprechverkehrstheorie behandelten Problemen verwandt. Die Bildnachricht als stochastischer Prozeß mit Gedächtnis steht jedoch im Gegensatz zum Fernsprechverkehr, welcher sich bei vergleichbarer mittlerer Aktivität wie ein gedächtnisloser Prozeß verhält [15].

Daher müssen Aussagen über die Leistungsfähigkeit von Multiplex-Übertragungseinrichtungen für Bilder durch direkte Anwendung der mathematischen Statistik untermauert werden.

1) bezogen auf die Bildfläche

2 Eingabe der Bilder in den Rechner

In diesem Kapitel wird erläutert, wie aus dem optisch in analoger Form gegebenen Bild das digitale, zeitdiskrete Bildsignal gewonnen wird. Das Minimum an Verfälschung des Bildinhaltes durch die Abtastung erreicht man mit dem aufwendigsten und teuersten Gerät, dem Lichtpunktabtaster. In der vorliegenden Arbeit wird dagegen eine Fernsehkamera verwendet. Es wird gezeigt, wie in Verbindung mit dem Rechner trotzdem ein hoher Störabstand im digitalisierten Bild erzielt wird. Außerdem wird die Anpassung der hohen Datenrate der Kamera an die niedrigere Eingaberate des Rechners behandelt.

2.1 Die opto-elektronische Bildabtastung - Überblick und Auswahl des Verfahrens

Aus dem optischen Bild kann auf unterschiedliche Weise das elektrische Bildsignal gewonnen werden.

Für die Rechneingabe ist der Lichtpunkt-Abtaster (Flying spot scanner) besonders gut geeignet. Hier wird die in Form eines Diapositivs gegebene Bildvorlage Bildpunkt für Bildpunkt mit Hilfe einer Kathodenstrahlröhre oder einem Laser aufgehellt und die nicht absorbierten Lichtmengen der so definierten Bildpunkte gemessen, quantisiert und im Rechner abgespeichert. Dieses Verfahren läuft asynchron ab, d.h. der Rechner ruft jeden Bildpunkt einzeln auf. Da genug Zeit für exakte Positionierung des Leuchtpunktes, Abgleich sei-

ner Helligkeit und Wandlung der Bildpunkthelligkeit besteht, ist die Originaltreue der digitalisierten Bilder optimal. Der einzige Nachteil des Verfahrens ist der hohe Geräteaufwand und die dadurch bedingten hohen Anschaffungskosten.

Vergleichbar gut in der Präzision der Bildabtastung im Rahmen der Fernschnorm (625 Zeilen, 5 MHz Bandbreite, 25 Bilder/s) sind die Aufnahmevorrichtungen der Fernsehstudios¹⁾. Der Diapositiv-Abtaster arbeitet als Lichtpunkt-Abtaster, die Studiokamera enthält eine Plumbikon- oder Vidikonröhre als Bildwandler. Die Studiokamera kostet weniger als der Diapositiv-Abtaster, beide haben jedoch das Problem der Geschwindigkeitsanpassung an den Rechner. Die Bandbreite des Videosignals von 5 MHz erfordert eine Abtastfrequenz von 10 MHz. Damit ergibt sich bei Helligkeitsquantisierung in 256 Graustufen (Codierung mit 8 bit) eine Datenrate von 80 Mbit/s. Dagegen ist die Aufnahme rate der Rechner durch den Kernspeicherzyklus auf 1 Rechnerwort (8 ... 32 bit)/1 µs oder 8 ... 32 Mbit/s begrenzt. Durch gestaffelte Kernspeicherzyklen (Interleaving) können 80 Mbit/s gerade erreicht werden. Jedoch kann auch dann der Rechner nur kurzzeitig mithalten, weil das Fassungsvermögen des Kernspeichers bei den üblicherweise verwendeten Prozeßrechnern 1/8 Fernseh bild selten überschreitet.

Für Wetterkarten und Zeichnungen ist der Faksimile-²⁾ Abtaster gut geeignet. Hier wird der von einer Papiervorlage reflektierte Lichtanteil des Abtaststrahls gemessen. Die Vorlage wird auf eine Trommel aufgespannt. Während die Trommel rotiert und so gegenüber der nicht mit rotierenden Reflexionsmeßeinrichtung die Zeilenbewegung ausführt, wird durch langsame Bewegung der Reflexionsmeßeinrichtung in Achsrichtung der Zeilenvorschub erzeugt. Neuere Entwicklungen dieses Gerätes er-

1) Robert Bosch Fernseh Anlagen GmbH, Darmstadt

2) Dr.-Ing. Rudolf Hell GmbH, Kiel

möglichen die Abtastung von Grautonvorlagen, wobei das Problem in der großformatigen, originaltreuen Herstellung dieser Vorlagen besteht.

Beim Mikrodensitometer¹⁾ wird eine transparente Bildvorlage (maximal 10 x 12 cm) relativ zum optischen Strahl- und Absorptionsmeßsystem bewegt. Die erreichbare örtliche Auflösung ist wesentlich feiner als beim Fernsehen (Punktdistanz < 10 µm). Das Gerät ist mit einer Vorrichtung zur Bildausgabe kombiniert, bei der ein fotografischer Film relativ zum hellichkeitsmodulierten Lichtstrahl bewegt wird. Das Mikrodensitometer gehört zu den teuersten Bildabtastgeräten.

Weiterhin zu erwähnen sind relativ seltene Spezialformen der elektronischen Kamera, welche entweder eine langsamere Bildabtastung als bei der Fernsehnorm haben (slow scan TV) oder die freie Positionierung des Abtaststrahls auf dem Target des Vidikons²⁾ erlauben. Hierbei wird eine sehr hohe zeitliche Beständigkeit des Ladungsbildes gegen Auflösungsverschlechterung im Vidikon benötigt. Dafür eignet sich das noch in Entwicklung befindliche Multidiodenvidikon besonders gut. Eine spezielle Wandlerröhre für die punktweise Bildabtastung ist der sog. Image Dissector. Hier wird das Bild auf einer Fotokathode erzeugt. Die emittierten Elektronen werden elektronenoptisch so auf eine Lochblende gelenkt, daß nur die Elektronen des gewünschten Bildpunktes durchtreten und den Fotovervielfacher erreichen können. Die Kamera mit Image Dissector kostet etwa das 10-fache einer sehr guten Fernsehkamera.

1) Fa. Optronics, Chelmsfort, Mass., USA

2) Data Digitizer, Fa. EMR Photoelectric, Princeton, New Jersey, USA

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit realisierte Bild-abtastvorrichtung wurde die Bildzerlegung nach der Fernseh-norm gewählt. Allerdings stand aus Kostengründen kein kom-merzieller Diapositiv-Abtaster zur Verfügung, sondern nur eine gute Industrie-Fernsehkamera, deren Bildgüte noch eini-ge Wünsche offen läßt. Der Vorteil dieser Wahl besteht dar-in, in Zusammenhang mit der Fernsehtechnik auf eine hoch-entwickelte und doch flexible und preiswerte Gerätetechno-logie zurückgreifen zu können. Die verwendete Kamera könn-te wegen der genormten Schnittstelle kurzfristig durch eine bessere Einrichtung ersetzt oder anderweitig eingesetzt wer-den.

2.2 Anpassung der Datenrate der Kamera an den Rechner

In Abschnitt 2.1 wurde das Problem der Datenraten-Anpassung zwischen Bildabtastgerät und Rechner erläutert. Der verwen-dete Rechner HP 2100 A (Hewlett Packard) hat eine Wortlänge von 16 bit und einen Speicherzyklus von 980 ns. Packt man je 2 Bildpunkte zu einem Speicherwort zusammen, so könnten 2 Bildpunkte/ μ s oder 16 Mbit/s (Quantisierung in 256 Grau-stufen) aufgenommen werden. Die lückenlose Abtastung des Ka-merasignals würde dagegen 10 Bildpunkte/ μ s liefern. Die zwei-te Beschränkung ist durch die Größe des Kernspeichers gege-ben, wo neben dem Programm ca. 9000 Worte zur Bildpunktspei-cherung zur Verfügung stehen. Die eigentliche Abspeicherung der Bilder erfolgt auf dem Hintergrundspeicher (Platte).

Die Bildeingabe erfordert also eine Untersetzung der Bild-datenrate auf 2 Ebenen:

- 1) Bildpunkt-Ebene: Vergrößerung des zeitlichen Abstandes zwischen den Bildpunkten im Verhältnis mindestens 1:5,
- 2) Bildsegment-Ebene: Einfügung von Pausen in den Abtast-prozeß zur Übertragung des im Kernspeicher abgelegten Bildsegments in den Hintergrundspeicher.

das Blockschaltbild der Gesamtanordnung.

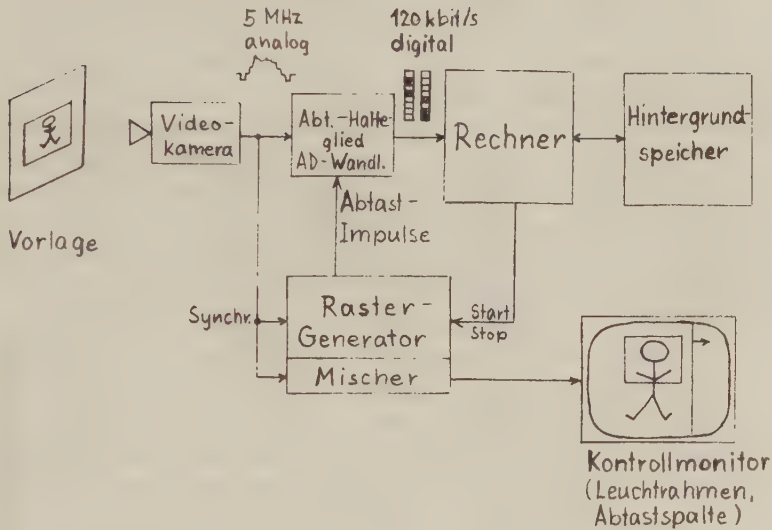


Bild 2.2 Blockschaltbild der Bildeingabe-Anordnung

Der für die Umsetzung der Datenrate verantwortliche Teil ist der in Eigenbau erstellte Rastergenerator. Sein Aufbau wird im folgenden erläutert. In Bild 2.3 ist sein Blockschaltbild auf der Ebene der Funktionseinheiten dargestellt.

Auf der linken Seite des Bildes wird das BAS-Signal (Bildsignal mit Austastlücke und Synchronimpulsen) eingespeist. Im Synchron-Verstärker wird das gemischte Synchronsignal (H/V) sowie das reine Vertikal-Synchronsignal (V) gewonnen und in TTL-Pegeln bereitgestellt. Das gemischte Synchronsignal dient

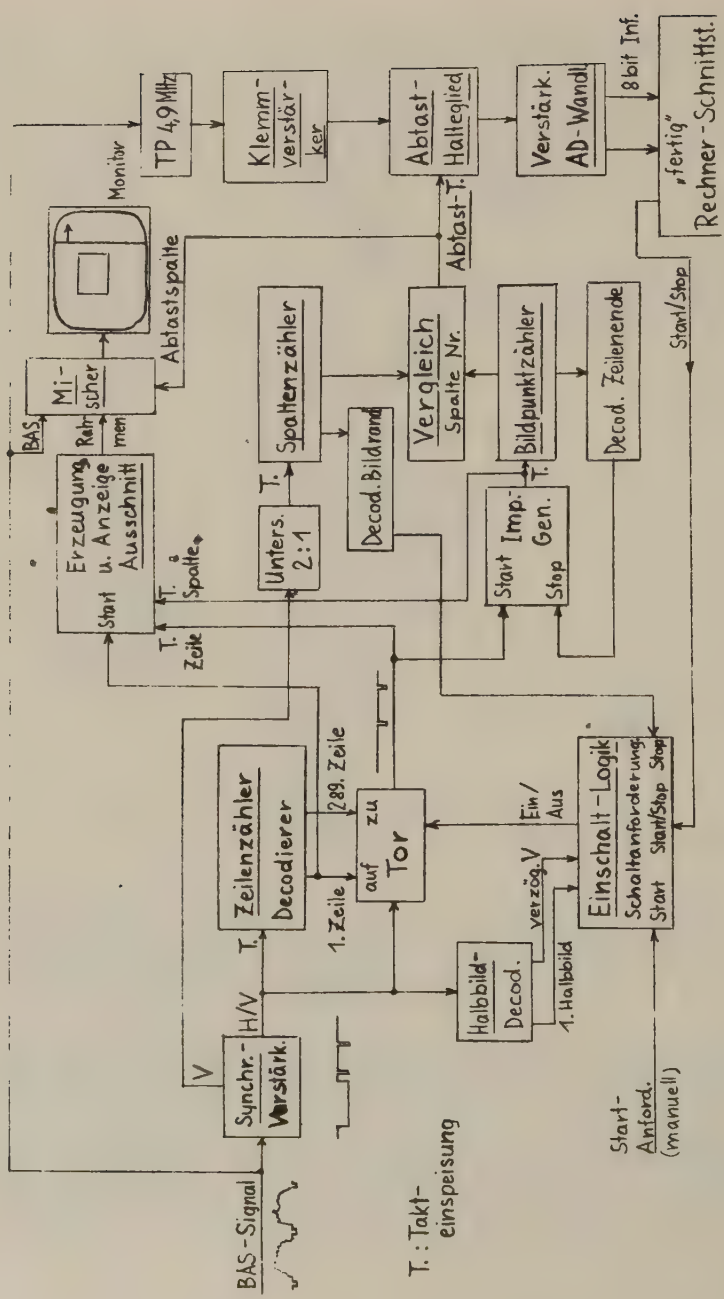


Bild 2.3 Der Rastergenerator

als Zähltakt für den ständig mitlaufenden Zeilenzähler. Er wird durch das Vertikal-Synchronsignal auf Null gesetzt. Der Halbbild-Decodierer gewinnt aus dem gemischten Synchronsignal das Halbbildsignal und einen verzögerten V-Impuls. Beide Signale werden der Einschalt-Logik zugeführt, wo sie Schaltanforderungen bezüglich Start/Stop-Abtastung definiert zu Beginn des 1. Halbbildes erledigen. Die Einschaltlogik synchronisiert also den Rastergenerator mit dem Bildrhythmus der Kamera. Mit Start wird der Zustand "Ein", mit Stop der Zustand "Aus" erzeugt. Die Zustandsinformation wird der Torschaltung mitgeteilt, welche im Zustand "Ein" die Horizontal-Synchronimpulse für die sichtbaren Zeilen 1 bis 288 jedes Halbbildes durchläßt. Mit diesen Impulsen wird der Impulsgenerator gestartet, welcher den Bildpunkt-Takt erzeugt, mit dem der Bildpunktzähler arbeitet.

Der Bildpunkt-Takt markiert also die Zeitpunkte, zu denen die Bildpunkte abgetastet werden können. Er ist mit einem integrierten, spannungsgesteuerten Impulsgenerator aufgebaut und mit größter Sorgfalt gegen Frequenzstörungen abgesichert. Das verbliebene "Bildpunktzittern" kann selbst am Zeilenende vernachlässigt werden. Der Impulsgenerator und die angeschlossenen Einheiten sind für Frequenzen bis zu 15 MHz ausgelegt, so daß Bilder mit bis zu 768 Spalten abgetastet werden können.

Der Inhalt des Bildpunktzählers wird ständig mit dem Inhalt des Spaltenzählers verglichen. Stimmen beide überein, so wird ein Abtastimpuls erzeugt. Der Inhalt des Bildpunktzählers wird außerdem hinsichtlich Zeilenende decodiert. Am Zeilenende wird der Impulsgenerator gestoppt und der Bildpunktzähler auf Null gesetzt.

Der Spaltenzähler bestimmt durch seinen jeweiligen Inhalt die laufende Abtastspalte. Er wird durch den im Verhältnis 2:1 unteretzten Vertikal-Synchronimpuls weitergezählt,

wobei die Untersetzung der Unterdrückung des Zählimpulses nach dem 1. Halbbild entspricht. Erreicht der Spaltenzähler den rechten Bildrand, so gibt der Decodierer eine Stop-Anforderung an die Einschaltlogik.

Das Videosignal¹⁾ wird in der Klemmschaltung mit dem sog. Synchronboden (Boden des Synchronimpulses) auf OV stabilisiert und vorverstärkt. Am Eingang des Abtast-Haltegliedes (Typ SHM-2, Datel-Systems Inc.) beträgt die maximale Signalspannung 2 V Spitze-Spitze. Sie wird am Ausgang des Abtasthaltegliedes auf 10 V Spitze-Spitze verstärkt. Dieser Verstärker ist einstellbar auf optimale Aussteuerung des AD-Wandlers (Typ ADC 560-12A-E, Hybrid Systems Corp.) mit unterschiedlichen Bildvorlagen. Der AD-Wandler liefert neben der binären Bildpunkt-Helligkeit das "Fertig"-Signal, welches die Übernahme des Bildpunktes auslöst, an die Rechner-Schnittstelle. Über die gleiche Schnittstelle werden auch die Start-Stop-Anforderungen des Rechners an die Einschaltlogik transferiert.

Mit Hilfe einer Zusatzeinheit wird ein nach Größe und Position verstellbarer rechteckiger Ausschnitt-Leuchtrahmen erzeugt. Seine Lage und Abmessungen werden an einer Dezimalanzeige dargestellt. Leuchtrahmen und Abtasttakt werden im Mischer dem Videosignal zur Wiedergabe auf dem Kontroll-Monitor überlagert. Für die Ausschnitt-Verarbeitung im Rechner wird der Leuchtrahmen mit Sichtkontrolle am Monitor eingestellt. Die an der Anzeige abgelesenen Positions- und Ausdehnungsdaten werden als Programmparameter eingegeben.

Der Rastergenerator wird im normalen Betriebsfall durch den Rechner gestartet. Für Test- und Vorführzwecke ist ein manueller Start vorgesehen.

1) bandbegrenzt durch Tiefpaß 4,9 MHz (Typ Matthey FL4/557D)

Die Übernahme der Bildpunkte durch den Rechner erfolgt unter der Kontrolle der Einrichtung für den direkten Kernspeicherzugriff (Direct Memory Access).

2.3 Der Störabstand des quantisierten Bildes

Durch die Zerlegung eines Bildes in Bildpunkte und die Quantisierung ihrer Helligkeit wird der ursprüngliche Inhalt des Bildes verfälscht. Man kann diese Verfälschung durch ein Störbild beschreiben, welches dem ursprünglichen Bild additiv überlagert ist. Liegt der Bildzerlegung in Zeilen die Fernsehnorm und der Zeilenzerlegung in Bildpunkte das Abtasttheorem zugrunde, so handelt es sich bei der Zerlegung des Bildes um eine Irrelevanzreduktion im Sinne eines Beobachters, welcher das Monitorbild aus der vorgeschriebenen Entfernung betrachtet. Für die Berechnung des Störabstandes wird daher dieses zerlegte Bild als Bezugsbild mit der Störung null definiert. Vom oben erwähnten Störbild gehen also nur jene Anteile in den Störabstand ein, welche nicht von der Bildzerlegung herrühren.

Der Störabstand für Fernsehbilder ist nach Bödeker u.a. [16] definiert als

$$\text{Störabstand in dB} = 20 \cdot \lg \frac{\text{Signalspannung Schwarzweißsprung}}{\text{Effektivwert der Störspannung}}.$$

Durch die Quantisierung wird dem Bildsignal ein Rauschsignal mit gleichverteilten Amplitudenwerten im Intervall

$$-\frac{1}{2} \Delta u \dots + \frac{1}{2} \Delta u$$

überlagert (Δu bezeichnet den Spannungswert der Quantisierungsstufe). Für ein ideal linear in 256 Graustufen quantisiertes Bild ergibt sich damit folgende Rechnung:

(sämtliche Leistungen sind normiert auf den Wert $\Delta u^2/R$, wobei R der Bezugswiderstand ist)

Mittlere Leistung des Quantisierungsrauschens:

$$N_Q = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} x^2 dx = \frac{1}{12}$$

Effektivwert des Quantisierungsfehlers: $f_Q = \sqrt{N_Q} = 0,29$

$$\text{Störabstand} = 20 \cdot \lg \frac{256}{0,29} \text{ dB} = 58,9 \text{ dB.}$$

=====

Um den Einfluß einer weiteren Störquelle zu beurteilen, kann man ihre Leistung auf die des Quantisierungsrauschens beziehen und gemäß folgender Rechnung die Verminderung des Störabstandes bestimmen.

Störabstand, bedingt durch die Störleistungen N_Q und N_X :

$$\begin{aligned} 10 \cdot \lg \frac{(256)^2}{N_Q + N_X} &= 10 \cdot \lg \frac{(256)^2}{N_Q \cdot (1 + N_X/N_Q)} \\ &= \underbrace{10 \cdot \lg \frac{(256)^2}{N_Q}}_{\text{ursprüngl. Störabstand}} - \underbrace{10 \cdot \lg (1 + \frac{N_X}{N_Q})}_{\text{Verminderung des ursprüngl. Störabst.}} \end{aligned}$$

Der Einfluß folgender Störquellen wird diskutiert bzw. abgeschätzt:

- 1) Rauschen des Vidikonverstärkers
- 2) Quantisierungsfehler infolge Sollwert-Abweichungen der Schwellenspannungen des AD-Wandlers
- 3) Schärfeverlust durch verminderte Modulationstiefe der Kamera bei hohen Frequenzen.

Das Rauschen des Vidikon-Verstärkers¹⁾ äußert sich in Schwankungen der quantisierten Helligkeit bei wiederholter Abtastung

1) Das Rauschen des Vidikons selbst ist zu vernachlässigen [17]

desselben Bildpunktes. Ein entsprechendes Experiment mit 9 Bildpunkten, welche gemäß Bild 2.4 über die Bildvorlage "Playboy" verteilt sind, ergibt bei Quantisierung in 256 Helligkeitswerte eine gute Annäherung der Helligkeitsschwan-

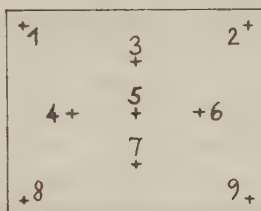


Bild 2.4 Verteilung der Testpunkte für die Rauschmessung

kungen der einzelnen Punkte an die Normalverteilung. Die mittlere Varianz σ^2 dieser Verteilungen, welche der auf $\Delta u^2/R$ normierten Rauschleistung entspricht, beträgt

$$N_R = 2,29 .$$

Durch wiederholte Abtastung einer Bildvorlage und Mittelung der Helligkeitswerte kann diese Störung stark reduziert werden. Für die mittlere Standardabweichung σ_n nach n-facher Abtastung und Mittelung gilt:

$$\sigma_n = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{n \cdot \sigma_1^2} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{n}}$$

Die Rundung des Mittelwertes der Helligkeit auf eine ganze Zahl entspricht einem weiteren Quantisierungsprozeß, bei dem den Helligkeitswerten Quantisierungsrauschen überlagert wird. Damit ergibt sich die Störleistung N_n nach n-facher Mittelung zu

$$N_n = \frac{1}{n} (N_Q + N_R) + N_Q .$$

Für die in dieser Arbeit berichteten Untersuchungen wurden die Bildvorlagen 30-fach gemittelt. Damit ergibt sich

$$N_n = \frac{1}{30} (0,083 + 2,29) + 0,083 = 0,162 .$$

Der durch das Rauschen des Vidikonverstärkers bedingte zusätzliche Störleistungsbeitrag ist demnach

$$\bar{N}_R = N_n - N_Q = 0,079 .$$

Der Störleistungsbeitrag des AD-Wandlers besteht in Quantisierungsfehlern, welche durch Sollwert-Abweichungen seiner Schwellenspannungen ausgelöst werden. Der hier verwendete AD-Wandler wurde statisch durchgemessen. Dabei ergab sich eine nahezu gleichmäßige Verteilung der Sollwert-Abweichungen mit der mittleren Standardabweichung $\zeta_{AD} = 0,13$. Der zusätzliche Störleistungsbeitrag des AD-Wandlers beträgt damit

$$N_{AD} = (0,13)^2 = 0,017 .$$

Betrachtet man die Schwingungen des Videosignals, welche bei Aufnahme von Strichrastern unterschiedlicher Feinheit bei gleichem Kontrast entstehen, so ist die Modulationstiefe bei einer bestimmten Frequenz das Verhältnis der Schwingungsamplitude bei dieser Frequenz zur Amplitude der 1 MHz-Schwingung. Bei der für die Bildabtastung verwendeten Kamera ergaben sich die Werte

- 100 % für Frequenzen = 3 MHz,
- 80 % bei 4 MHz
- 64 % bei 5 MHz,

aufgenommen mit einem Strichraster-Diapositiv bei optimaler Einstellung der mittleren Bildhelligkeit. Diese Charakteristik führt zu einer "Kantenverschleifung", wie sie z. B. auch in Bild 3.1 zu beobachten ist (weitere Verschleifung

durch entsprechende Charakteristik des Monitors eingeschlossen).

Die Dämpfung der hohen Frequenzanteile entspricht einem hypothetischen Störsignal, welches gerade an den scharfen Kanten das Bildsignal teilweise aufhebt. Eine Probemessung der Spektralverteilung der Frequenzkomponenten des analogen Videosignals ergab für die Spannung oberhalb 3 MHz einen gleichmäßigen Verlauf bei -40 dB gegenüber der Spannung bei der Frequenz 0. Die Annahme, daß es sich dabei um Rauschen handelt, wird durch folgende Betrachtung bestätigt:

Mittlere normale Rauschamplitude des digitalen Bildsignals:

$$\sqrt{2,29} = 1,51$$

Amplitude der Gleichkomponente: etwa 128 (halber Aussteuerbereich)

$$\text{Verhältnis: } 20 \cdot \lg \frac{128}{1,51} = 38,6 \text{ [dB]}$$

=====

Damit ist gezeigt, daß etwaige Signalkomponenten oberhalb 3 MHz nur außerordentlich geringe Leistungsbeiträge enthalten können. Ihre Messung am Analogsignal ist nicht möglich. Von einer Messung am gemittelten Digitalsignal wurde abgesehen, da der zu erwartende Einfluß auf die Störabstandsrechnung vernachlässigbar ist.

Die insgesamt erreichte Verminderung des Störabstandes ergibt sich zu

$$\begin{aligned} V_{\text{ges.}} &= 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{\bar{N}_R}{N_Q} + \frac{N_{AD}}{N_Q} \right) \text{ dB} \\ &= 10 \cdot \lg (1 + 0,952 + 0,205) \text{ dB} = 3,34 \text{ dB} \end{aligned}$$

=====

Eine weitere Verfälschung des Bildinhalts wird durch die ungleichmäßige Empfindlichkeit des Vidikons über die Bildflä-

che bewirkt. Es handelt sich dabei um einen großflächigen Effekt, welcher auf das digitale Bild bei Differenzcodierung keinen merklichen Einfluß hat.

Der berechnete Wert von 3,34 dB für die Verminderung des Störabstandes bei der Bildabtastung darf zwar nicht streng im Sinne der Definition des Störabstandes bei Fernsehbildern nach [16] interpretiert werden. Trotzdem zeigt die Abschätzung, daß mit dem hier gewählten Geräteaufwand die Rechneingabe von Bildern mit hoher Qualität erreicht wird.

2.4 Der Vorgang der Abtastung und Speicherung eines Bildes

Die Eingabe eines Bildes wird in folgenden Schritten durchgeführt:

- 1) Einstellung des Aussteuerverstärkers auf optimale Aussteuerung des AD-Wandlers
- 2) wiederholte Abtastung des Bildes spaltenweise
- 3) Mittelung der Abtastwerte und Rekonstruktion der Zeilenstruktur im Speicher.

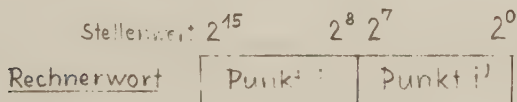
Schritt 1 wird im Wechsel zwischen Probe-Abtastung der Vorlage und manueller Nachregelung des Verstärkers iterativ erledigt. Die Einstellung erfolgt so, daß die bei der Probeabtastung ermittelten Werte der Maximal- und Minimalhelligkeit, denen das Rauschen des Vidikonverstärkers noch voll überlagert ist, etwa 10 Helligkeitsstufen von den Grenzwerten des Aussteuerbereiches (0 bzw. 255) entfernt sind. Damit ist gewährleistet, daß keine Details verlorengehen, und daß die Ausmittelung des Vidikonverstärker-Rauschens auch bei extremen Helligkeitswerten funktioniert.

Die Schritte 2 und 3 erfolgen automatisch unter Kontrolle des Bildeingabe-Programmes. Das Programm ist fast ausschließ-

lich in der Sprache FORTRAN geschrieben und läuft im Rahmen des Betriebssystems DOS-M der Rechananlage HP 2100A. Lediglich derjenige Teil des Programmes, welcher den unmittelbaren Verkehr mit der Schnittstelle zum Rastergenerator abwickelt, der sog. Driver, ist in der Sprache ASSEMBLER programmiert.

Für die Speicherung der aufgenommenen Bildpunkte im Kernspeicher steht ein Feld mit 9216 Worten zu 16 bit zur Verfügung. Da im Verlauf der wiederholten Bildabtastung die Helligkeitswerte jedes Bildpunktes zunächst aufaddiert werden, muß für jeden Bildpunkt 1 Rechnerwort reserviert werden. Somit können mit einer Kernspeicherbelegung 16 Spalten zu je 576 Bildpunkten aufgenommen werden. Das Spaltenpaket wird anschließend in einer Pufferzone auf dem Plattenspeicher abgelegt. Bei der nächsten Abtastung derselben Spalten wird das betreffende Spaltenpaket zur Aufaddition der neuen Abtastwerte wieder in den Kernspeicher geholt. Es ergibt sich ein alternierender Betrieb zwischen Abtastung von 16 Spalten und Austausch der Spaltenpakete mit dem Plattenspeicher.

Nach Abschluß der Abtastungen erfolgt die Rekonstruktion der Zeilenstruktur in mehreren Durchgängen. Erschwerend ist dabei der Umstand, daß jeweils nur der halbe Speicherbereich zur Bereitstellung von Bildpunkten ausgenutzt werden kann, während in der anderen Hälfte die neue Struktur aufgebaut wird. Außerdem müssen sämtliche Paketeinteilungen ganze Vielfache der Plattentransfereinheit von 128 Worten ergeben. Im 1. Durchgang wird die Division durch die Anzahl der Abtastungen durchgeführt und die jeweils gleichnummerierten Bildpunkte der beiden Halbbilder gemäß folgendem Schema in ein Rechnerwort gepackt (vgl. Bild 2.1).



Damit geht die Anzahl der belegten Worte auf die Hälfte herunter. Dieses Stadium ist in Bild 2.5a) dargestellt. Die Bildpunkte wurden bereits bei der Abtastung zu Zeilensegmenten der Länge 16 zusammengefügt. Im 2. Durchgang werden Segmente der Länge 32 gebildet entsprechend Bild 2.5b). Im 3. Durchgang werden schließlich Segment-Pakete aus 32 Spalten und 4 Zeilen zu Zeilenstreifen zusammengesetzt (Bild 2.5c)).

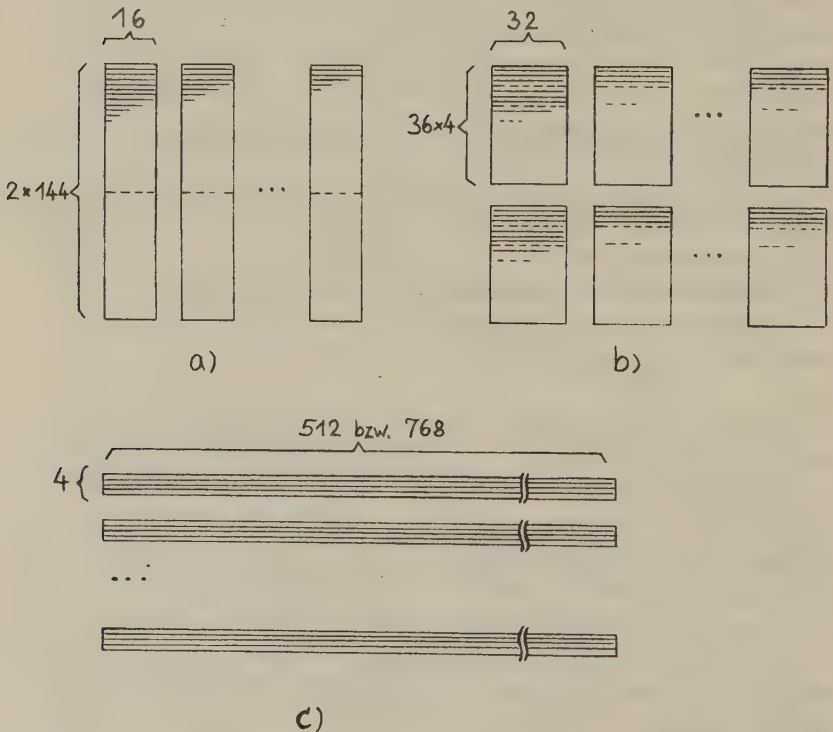


Bild 2.5 Die Stadien der Bildzeilen-Rekonstruktion

Die so rekonstruierten Bilder haben 294.912 bzw. 442.368 Bildpunkte, je nachdem ob mit 10 MHz oder 15 MHz abgetastet wurde. (Für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurde stets mit 10 MHz abgetastet.) Auf einer Kassette des verwendeten Plattenspeichers haben maximal 8 bzw. 5 Bilder Platz. Die Aufnahme eines Bildes mit 30-facher Mittelung dauert etwa 30 Minuten.

3 Die statistischen Eigenschaften der Bildquelle

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften des digitalen Bildsignals, wie es sich als Folge der codierten Helligkeitswerte in Zeilenrichtung ergibt, mit den Eigenschaften einer Markow-Kette verglichen. Die grundlegende statistische Eigenschaft der Markow-Kette¹⁾ resultiert aus der Gedächtnislosigkeit der Quelle, welche die Kette aussendet. Bezogen auf die Bildquelle würde Gedächtnislosigkeit bedeuten, daß die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Abtastwerten, d. h. die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten gewisser Werte des Differenzsignals, von keinen weiteren Abtastwerten abhängen. Bei einer gedächtnislosen, differenzcodierten Bildquelle wäre also jede Differenz vom Wert der vorhergehenden unabhängig. Es wird an verschiedenen meßbaren Zusammenhängen gezeigt, in welchem Maße diese Bedingung verletzt wird. Dabei erweist es sich mitunter als zweckmäßig, nicht die zeitliche Folge der Differenzwerte, sondern ihre örtliche Zuordnung im Bild zu betrachten. Die Untersuchung geschieht in Hinblick auf die Entwicklung eines mathematischen Modells zur Berechnung der Fehlerverteilung des Bildüberlagerungs-Verfahrens im Kapitel 4.

3.1 Überblick über das Bildmaterial, Auswahl der Quantisierung

Die Untersuchungen wurden mit den 4 in Bild 3.1 dargestellten Bildvorlagen durchgeführt. Bei den Vorlagen a) - c) handelt es sich um die in der Bundesrepublik Deutschland üblichen Testbilder für Bildcodiereinrichtungen [20]. Die Vorlage d), welche reich an feinen Details und scharfen Kontrasten ist, ist eine Darstellung aus der Nürnberger Innenstadt.

1)gemeint ist die Markow-Kette 1. Ordnung [19]



a)

"Playboy"



e)



b)

"Strohhutdame"



f)

Bild 3.1 Bildvorlagen 1 und 2

a), b) im Original (Reproduktion)

e), f) Helligkeit quantisiert in 32 Stufen
(Monitoraufnahme)



c)

"Küchenszene"



g)



d)

"Dürerhaus"



h)

Bild 3.1 Bildvorlagen 3 und 4

c), d) im Original (Reproduktion)

g), h) Helligkeit quantisiert in 32 Stufen
(Monitoraufnahme)

Zur Sprachvereinfachung in den weiteren Betrachtungen wird folgende Regelung getroffen:

Für ein von null verschiedenes Differenzsignal in einem Bildpunkt des differenzquantisierten Bildes wird allgemein der Begriff *B e l e g u n g* (B) eingeführt. Daraus folgt die Definition der *B e l e g u n g s d i c h t e* (h) als Verhältnis der Anzahl Belegungen zur Anzahl der betrachteten Bildpunkte. Soll auf die Größe des Differenzsignals Bezug genommen werden, so wird anstelle des Begriffs Belegung der Begriff *D i f f e r e n z* (D) verwendet.

In Kapitel 1 wurde gezeigt, daß die Wirkungsweise des MPZ-Verfahrens durch die Übertragung eines Überlagerungsbildes beschrieben werden kann. Daher wird für den Codiervorgang der Begriff *B i l d ü b e r l a g e r u n g* und für den Kanal im MPZ-System der Begriff *Ü b e r l a g e r u n g s - b i l d* eingeführt. Treffen in einem Zeitpunkt mehrere Übertragungsanforderungen zusammen, so entspricht das einer *M e h r f a c h b e l e g u n g* im Überlagerungsbild, welche zur Abweisung aller Übertragungsanforderungen bis auf eine führt. Für diese Abweisung wird der Begriff *V e r - d r ä n g u n g* benutzt, da die betreffende Differenz auf den zeitlich folgenden Bildpunkt verdrängt wird.

Wird eine Belegung verdrängt, so entsteht im betreffenden Bild ein *F e h l e r* (F), welcher ggf. auch im Zusammenhang mit der Größe des fehlenden Differenzsignals angegeben wird, z. B. Fehler der Größe 1 (f_1), Fehler der Größe 2 (f_2) usw.

Ausschlaggebend für die Fehlerhäufigkeit bei Bildüberlagerung ist die Belegungsichte der Bildvorlagen. Bild 3.2 zeigt die Abhängigkeit der Belegungsichte der Bildvorlagen von der Anzahl der Graustufen bei der Quantisierung. Mit zunehmender Anzahl Graustufen nimmt die Belegungsichte zu und

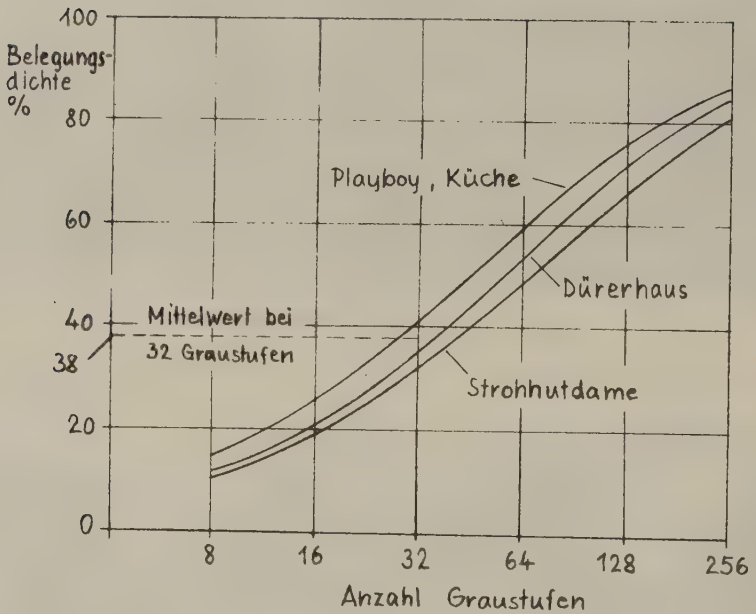


Bild 3.2 Die Belegungsdichte in Abhängigkeit von der Graustufenzahl

damit die Wahrscheinlichkeit für Mehrfachbelegungen im Überlagerungsbild. Andererseits werden zusätzliche Konturen anstelle allmählicher Grauton-Übergänge sichtbar, wenn die Anzahl der Graustufen zu klein ist. Die Entscheidung für eine bestimmte Graustufenzahl erfordert also einen Kompromiß. Da durch die unvermeidlichen Überlagerungsfehler eine gewisse Beeinträchtigung der Bildgüte verfahrensspezifisch ist, ist es naheliegend, auch an die Feinheit der Grauskala nicht die höchste Anforderung zu stellen. Daraus resultiert die

Festlegung auf die Skala mit 32 Graustufen, welche annehmbare Feinheit der Grauton-Abstufung gewährleistet (siehe Bild 3.1 e) - h)).

Die folgende Vergleichsbetrachtung zeigt, daß mit dieser Festlegung beim MPZ-Verfahren nur wenig mehr Codierungsaufwand pro Bildpunkt gebraucht wird, als es durch den mittleren Informationsgehalt der Bildquelle (Entropie) gefordert wird. Für die mittlere Anzahl Binärstellen $\bar{d}$ pro Bildpunkt gilt:

$$\bar{d} = p \cdot \left(d + \frac{ld \cdot k}{u} \right)$$

p: Häufigkeit von Differenzen größer null

d: Anzahl Binärstellen pro codierte Differenz

u: Anzahl Kanäle

k: Anzahl mögliche Quellenkombinationen bei u Kanälen

Der mittlere Informationsgehalt H der differenzcodierten Bildvorlagen wurde durch ein Rechnerprogramm nach der Formel

$$H = - \sum_{i=-32}^{32} p(i) \lg p(i)$$

p(i): Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Differenz i

bestimmt. Die folgende Tabelle zeigt die Gegenüberstellung für den ausgewählten Fall der Konzentration 3:1 für 2 verschiedene Differenzcodierungen, d. h. ± 16 Stufen linear ($\bar{d}_{16}$) sowie ± 4 Stufen ($\bar{d}_4$) nichtlinear. Die nichtlineare Stufung entspricht der in [21] verwendeten Skala.

	Playboy	Strohhutdame	Küche	Dürerhaus
mittl. Inf.-Gehalt [bit]	1,93	1,56	1,84	1,72
$\bar{d}_{16}$ [bit]	2,88	2,42	2,88	2,26
$\bar{d}_4$ [bit]	2,06	1,62	2,06	1,73

Bei linearer Differenzcodierung überschreitet die mittlere Codewortlänge den mittleren Informationsgehalt um 48 % und bei nichtlinearer Differenzcodierung um nur 6 %.

3.2 Analyse der Kettenstruktur des Bildquellensignals

Das Signal besteht aus einer Folge von Ketten von Belegungen und Pausen im Wechsel, wobei mit Pause eine Kette von Null-differenzen gemeint ist. Für die gedächtnislose Quelle läßt sich die Generation von Belegungsketten und Pausen durch das in Bild 3.3 dargestellte 2-Zustände-Modell beschreiben. Das Modell generiert eine Markow-Kette.

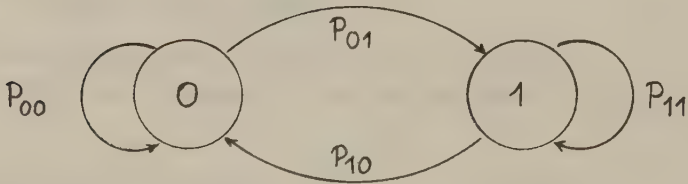


Bild 3.3 2-Zustände-Modell für die Generation von Belegungsketten (Zustand 1) und Pausen (Zustand 0)

Die Übergangswahrscheinlichkeiten P_{00} , P_{01} , P_{10} , P_{11} folgen aus der Belegungswahrscheinlichkeit p , welche der Belegungsdichte entspricht. Es gilt

$$\begin{aligned} P_{01} &= P_{11} = p \\ P_{10} &= P_{00} = 1 - p. \end{aligned}$$

Die Identitäten $P_{01} = P_{11}$ und $P_{10} = P_{00}$ spiegeln die Gedächtnislosigkeit der Quelle wieder. Für die Wahrscheinlichkeit

von Belegungsketten der Länge 1, bezogen auf die Menge aller Belegungsketten ergibt sich die Formel

$$P(l) = P_{01} \cdot P_{11}^{l-1} \cdot P_{10} \cdot \frac{1}{p} = p^{l-1} (1-p) .$$

Die Anwendung der obigen Formel mit $p = h^1$ für 2 stark unterschiedliche Bildvorlagen zeigt Bild 3.4, zusammen mit den tatsächlich gefundenen Längenverteilungen. Man erkennt, daß das Markow-Modell keine befriedigende Beschreibung der

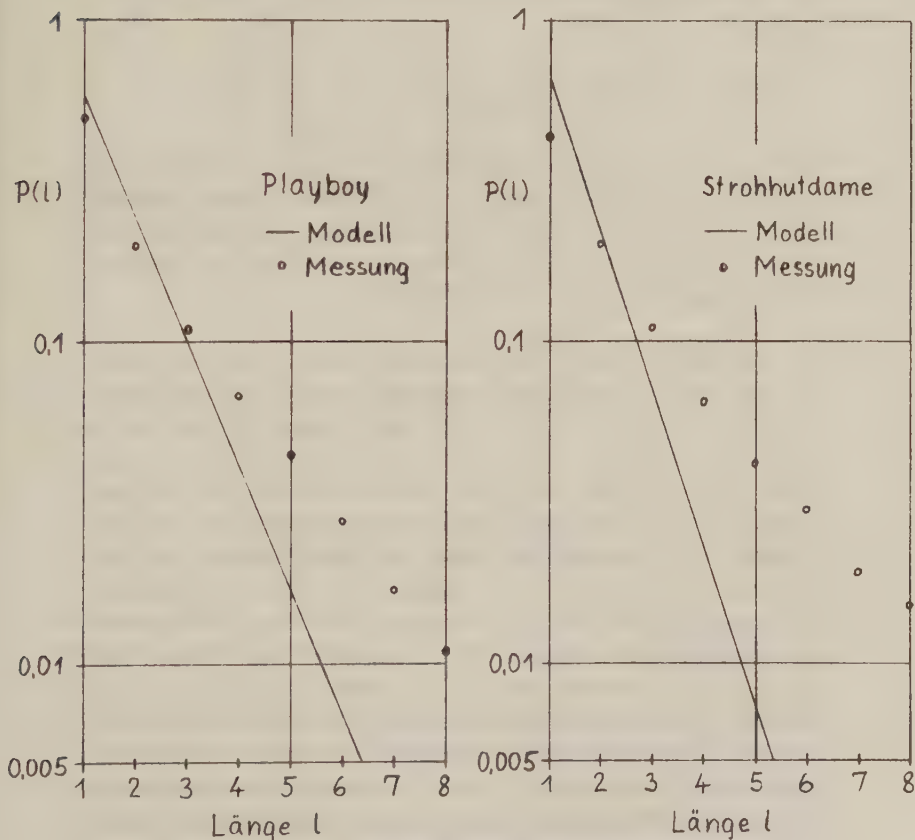


Bild 3.4 Verteilung der Belegungsketten-Längen

1) h = Belegungsdichte

Kettenlängen-Verteilung liefert, d. h. es liegen in Wirklichkeit mehr Belegungen in längeren Ketten. Dies spiegelt auch die Anzahl Belegungen pro 1000 Ketten in der folgenden Tabelle wieder:

Verteilung der Kettenlängen	Playboy	Strohhutdame	Küche	Dürerhaus
lt. Messung	2329	2228	2239	1906
lt. Modell	1699	1474	1699	1532

Anzahl Belegungen pro 1000 Ketten

Die statistischen Zahlen zeigen, daß in den tatsächlichen Bildern der Übergang Belegung - Belegung häufiger vorkommt als bei der gedächtnislosen Quelle. Dies wird bei der Berücksichtigung verdrängter Belegungen im Überlagerungsmodell in Kapitel 4 Beachtung finden.

Eine weitere Eigenheit der Bildquelle wird bei der Betrachtung der Verteilung der Differenzen über der Kettenlänge in Bild 3.5 deutlich. Bei regelloser Verteilung der Differenzen dürfte keine Abhängigkeit von der Kettenlänge vorliegen. Dagegen sind deutliche Abhängigkeiten an den Summenhäufigkeitskurven für verschiedene Differenzbeträge zu erkennen. Die Abszisse ist dabei so geteilt, daß sich die gestrichelte Gerade für die Summenhäufigkeit der regellosen Verteilung ergibt. Am Beispiel der Vorlage "Playboy" wird deutlich, daß in Ketten der Längen 1 und 2 praktisch keine großen Differenzbeträge vorkommen, für die anderen 3 Bildvorlagen ergeben sich analoge Verhältnisse. Da kontrastreiche Bildstellen durch große Differenzen charakterisiert sind, ist hiermit ein - naheliegender - Zusammenhang zwischen örtlicher Bildstruktur und örtlicher Verteilung der Belegungsketten nachgewiesen. Für das Überlage-

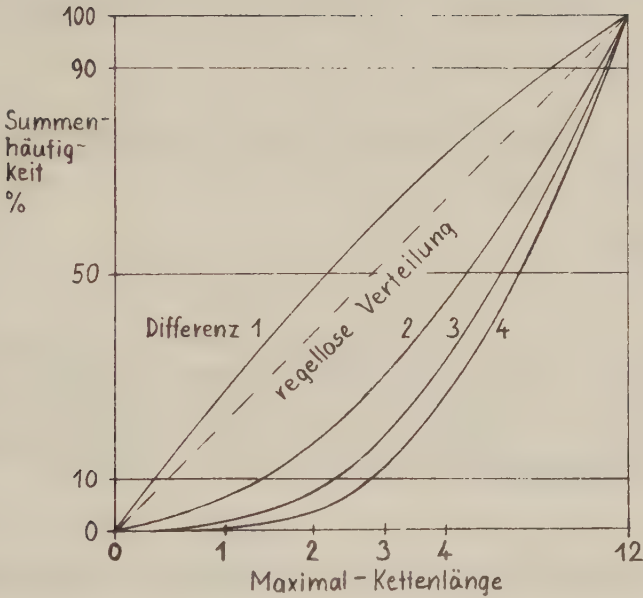


Bild 3.5 Die Verteilung der Differenzbeträge auf die Belegungsketten (Bild: Playboy)

rungsmodell ist von Bedeutung, daß in Ketten der Länge 1 vernachlässigbar wenige Differenzen größer 1 vorkommen.

Die Untersuchung des Vorzeichens aufeinanderfolgender Differenzen ergibt eine weitere Abweichung der Bildquelle von der gedächtnislosen Quelle. Die folgende Tabelle zeigt die Aufteilung der Übergänge Belegung - Belegung auf die Fälle "Vorzeichen gleich" und "Vorzeichenwechsel" für die 4 Bildvorlagen. Da die Differenzverteilungen der Bildvorlagen hin-

sichtlich der Häufigkeit positiver und negativer Differenzen Symmetrie aufweisen (siehe Anhang), müßte sich bei der für die gedächtnislose Quelle eingangs geforderten Unabhängigkeit aufeinanderfolgender Differenzen gleiche Häufigkeit für beide Fälle ergeben.

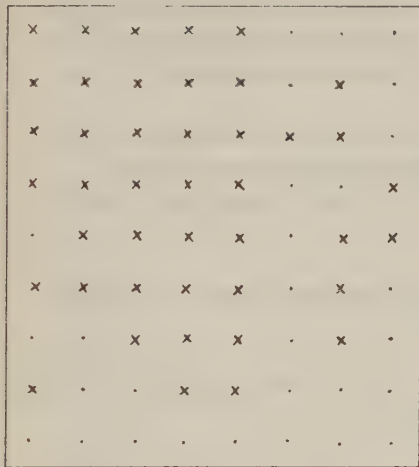
Bild	Playboy	Strohhutd.	Küche	Dürerhaus	Mittel
Vorzeichen gleich	65 %	57 %	63 %	52 %	59 %
Vorzeichenwechsel	35 %	43 %	37 %	48 %	41 %

Dagegen ist der Fall "Vorzeichen gleich" häufiger, sogar bei der an feinen Details sehr reichen Vorlage "Dürerhaus". Diese Tatsache ist für das Überlagerungsmodell wichtig an der Stelle, wo die Verschmelzung verdrängter Belegungen mit nachfolgenden Belegungen berücksichtigt wird.

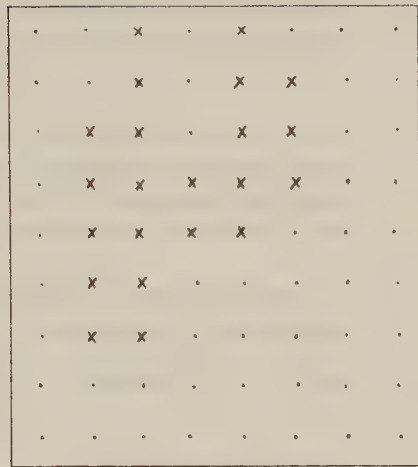
3.3 Die statistische Erfassung von Kontrast- und Detailzonen

Kontraste sind durch das Auftreten großer Differenzen charakterisiert, feine Details durch hohe Belegungsdichte. Häufig treten beide Merkmale gemeinsam auf. Um die örtliche Verteilung und Häufigkeit dieser Kontrastzonen zu erfassen, wird eine Teilfeld-Untersuchung durchgeführt. Dazu wird die Bildfläche in Teilfelder mit 64 x 64 Bildpunkten aufgeteilt und für diese Teilfelder die Belegungsdichte, der Effektivwert der Differenz und die mittlere Belegungskettenlänge bestimmt.

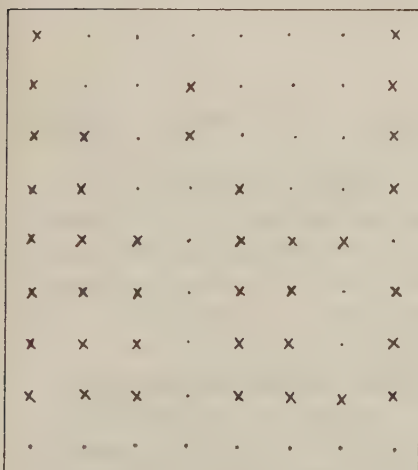
Als Maß für den Kontrastgehalt eines Teilfeldes wird der Effektivwert der Differenz benutzt. Ist er größer als 1, dann läßt dies auf einen nennenswerten Anteil von Differenzen größer 1 schließen. In Bild 3.6 sind die Ergebnisse dieser Auswertung für die 4 Bildvorlagen dargestellt. Die Teilfeld-



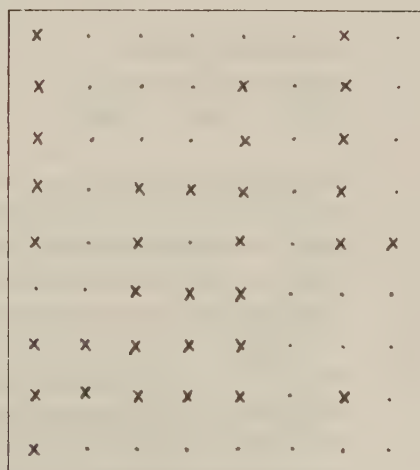
Playboy



Strohhutdame



Dürerhaus



Küche

Bild 3.6 Die örtliche Verteilung der Kontrastzonen, charakt. durch effektive Differenz > 1 (Markierung x)

Mittelpunkte sind durch Punkte angedeutet, Kontrastfelder außerdem durch x markiert. Der Vergleich der örtlichen Verteilung der markierten Teilfelder mit den Bildvorlagen (Bild 3.1) bestätigt die Brauchbarkeit der Methode.

Für die Bildüberlagerung interessieren die Überlappungsflächen der Kontrastfelder, da hier gemäß der Beschreibung des MPZ-Verfahrens in Kapitel 1 die Verdrängung auch großer Differenzen stattfindet.

Aus Bild 3.6 werden dafür folgende Werte entnommen (jeweils bezogen auf Bildfläche):

Anteil Kontrastfelder: 31 % ... 61 % (Strohhutd., Playboy)
im Mittel: 48 %

Überlappungsanteile
von Bildpaaren: 14 % ... 32 % (Strohhutd./Küche)
Playboy/Küche)
im Mittel: 24 %

Überlappung eines
Bildes mit den jeweils
anderen drei Bildern: 31 % ... 61 % (Strohhutd., Playboy)

Bei der Überlagerung von jeweils 2 Bildern wird also in jedem Bild etwa die Hälfte der Kontrastzonen durch die Kontrastzonen des anderen Bildes gestört. Bei Überlagerung von 4 Bildern ist die gesamte Kontrastfläche betroffen. Das wird durch experimentelle Untersuchungen von Tietze [21] bestätigt.

Der in Bild 3.5 gezeigte Zusammenhang zwischen Differenzwert und Länge der Belegungskette wird auch bei der Teilfeld-Untersuchung sichtbar. In Bild 3.7 ist die Korrelation zwischen mittlerer Belegungskettenlänge und Effektivwert der Differenz dargestellt. Die als Kontrastzonen angenommenen Teilfelder

mit Effektivwert der Differenz größer 1 haben größere mittlere Längen der Belegungsketten, also im einzelnen lange Ketten. Das war aber laut Bild 3.5 die Bedingung für das Auftreten großer Differenzen.



Bild 3.7 Korrelation zwischen Effektivwert der Differenz und mittl. Länge der Belegungskette, bezogen auf Teilfelder 64 x 64 Bildpunkte

3.4 Die Häufigkeit von Mehrfachbelegungen

Die folgende Betrachtung zeigt, mit welcher Häufigkeit Mehrfachbelegungen entstehen und daß bei der Bildüberlagerung

der theoretisch leichter zu behandelnde Fall von statistisch unabhängigen Quellen vorliegt.

Die statistische Unabhängigkeit der Quellen voneinander wird zunächst angenommen und die Berechtigung der Annahme anhand der Ergebnisse nachgewiesen. Der exakte Ansatz zur Berechnung der Häufigkeit von Mehrfachbelegungen bei Quellen unterschiedlicher Belegungsdichte ist die Multinomialverteilung. Stucki [10] hat jedoch für Quellen stark unterschiedlicher Belegungsdichte gezeigt, daß der exakte Ansatz sehr gut durch eine Binomialverteilung mit gemittelter Belegungsdichte angenähert wird. Da sich die Belegungsdichten der hier untersuchten Grautonbilder nur relativ wenig unterscheiden, wird ebenfalls die Binomialverteilung verwendet. In Bild 3.8 ist dies für 2 Bei-

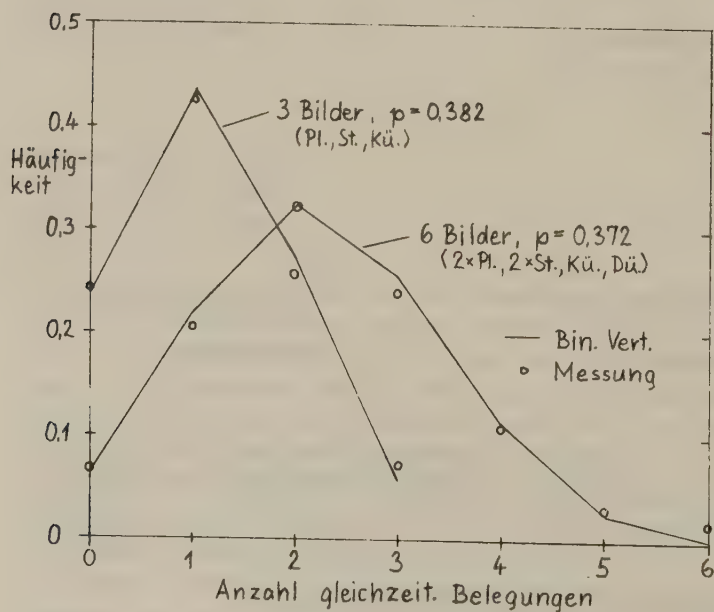


Bild 3.8 Verteilung der Anzahl gleichzeitiger Belegungen

spiele ausgeführt. Die eingezeichneten Meßwerte zeigen gute Übereinstimmung mit den theoretisch berechneten Wahrscheinlichkeiten und bestätigen damit den Ansatz, insbesondere auch die Annahme, daß sich die Bildquellen wie statistisch unabhängige Quellen verhalten.

Betrachtet man die Belegungsdichten der Teilfelder nach der in Abschnitt 3.3 eingeführten Bildzerlegung, so stellt man starke Streuung fest. Anhand dieser Streuung wird im folgenden die Gedächtniseigenschaft der Bildquelle nachgewiesen. Für eine gedächtnislose Vergleichsquelle der mittleren Belegungsdichte ergibt sich folgender Sachverhalt:

Für die Anzahl der Belegungen pro Teilfeld gilt die Binomialverteilung. Dies entspricht dem Fall, daß aus einer Grundgesamtheit mit einem Merkmal (Belegung) der Häufigkeit h Stichproben vom Umfang $64 \times 64 = 4096$ entnommen werden. Die Standardabweichung dieser Verteilung wird mit der tatsächlich feststellbaren Standardabweichung der Bildvorlagen verglichen. Es ergeben sich folgende Werte:

	theoret. Standardabweichung der Teilfeld-Belegungszahl	tatsächl. Standardabweichung der Teilfeld-Belegungszahl
Playboy	31,5	477
Strohhutdame	29,9	770

Die tatsächlichen Werte liegen erheblich über den theoretisch berechneten. Das hat seine Ursache darin, daß die Elemente der Stichproben d. h. die Bildpunkte eines Teilfeldes untereinander stark abhängig sind.

Es werde nun folgendes Gedankenexperiment zur Elimination dieser Abhängigkeit durchgeführt: In den Teilfeldern läuft ein Bildpunkt-Verschmelzungsverfahren ab, bei dem jeweils zwei voneinander als Belegung oder Nichtbelegung abhängige benachbarte Bildpunkte zu einem verschmolzen werden. Dieser Vorgang endet erst, wenn keine Abhängigkeiten zwischen Bildpunkten mehr vorhanden sind. Die Anzahl von Bildpunkten pro Teilfeld bzw. Stichprobe hat sich damit verkleinert, z. B. auf die Zahl m . Die Teilfeld-Belegungsdichte, d. h. Anzahl Belegungen / Anzahl Bildpunkte hat sich nicht verändert. Die verbliebenen m Bildpunkte in den Teilfeldern sind nun statistisch unabhängig. Das bedeutet, daß die Verteilung der tatsächlichen Belegungsdichten der theoretischen Verteilung für Teilfelder mit m Bildpunkten entspricht. Damit kann die Zahl m nach der Formel für die Varianz einer Summe von Zufallsvariablen abgeschätzt werden.

Es gilt:

$$\sigma_m^2 = m \cdot \sigma_1^2$$

$$= m \cdot h \cdot (1-h)$$

$$\sigma_1^2 = h \cdot (1-h)$$

h : Gesamtbild-Belegungsdichte

Lt. Ged.-Exper. gilt:

$$\frac{\sigma_m}{m} = \frac{S_x}{4096}$$

S_x : tatsächl. Standardabweichung der Teilfeld-Belegungszahl (siehe obige Aufstellung)

Daraus folgt:

$$\left(m \cdot \frac{S_x}{4096} \right)^2 = m \cdot h \cdot (1-h)$$

$$m = \frac{h \cdot (1-h)}{\left(\frac{S_x}{4096} \right)^2}$$

Es ergeben sich folgende Werte:

Playboy:	$m = 17,9$ Bildpunkte	$4096/m = 229$
Strohhutdame:	$m = 6,2$ Bildpunkte	$4096/m = 661$

Die Zahl 4096/m gibt an, wieviele Bildpunkte jeweils im Mittel verschmolzen werden müssen, und ist somit ein Maß für den Grad der Abhängigkeit.

Die Verteilungen sind in Bild 3.9 aufgezeichnet. Als Näherung für die Binomialverteilung wurde die Normalverteilung verwendet. Die Darstellung zeigt die gute Übereinstimmung

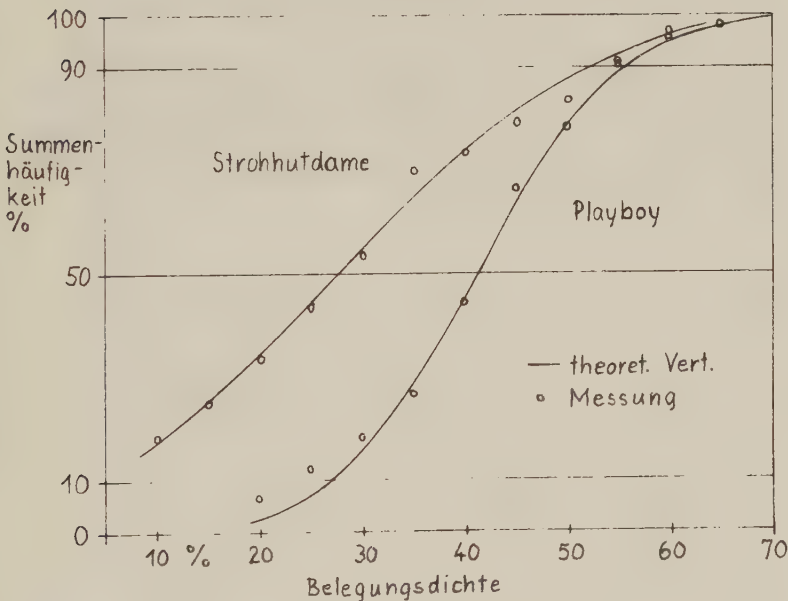


Bild 3.9 Verteilung der Teilfeld-Belegungsdichten

zwischen theoretischer und tatsächlicher Verteilung der Belegungsdichten. Damit ist die Verteilung der Teilfeld-Belegungsdichten durch das statistische Modell einer Quelle mit Gedächtnis erklärt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich die Gesamthäufigkeit von Mehrfachbelegungen über die Bildfläche wie bei der Überlagerung gedächtnisloser, voneinander unabhängiger Quellen ergibt. Die Teilbetrachtung zeigt jedoch wesentlich stärkere Schwankungen der Belegungsdichte in den Bildern, als dies bei gedächtnislosen Quellen der Fall wäre. Diese Schwankungen können durch die Annahme einer gedächtnisbehafteten Quelle erklärt werden. Hinsichtlich der örtlichen Häufigkeit von Mehrfachbelegungen bedeutet dies, daß Konzentrationen von Mehrfachbelegungen/Teilfeld (insbesondere besonders hohe und besonders niedrige Werte), wie sie bei regelloser Verteilung der Belegungen nur auf sehr kleinen Teilflächen vorkommen, auf den relativ großen betrachteten Teilfeldern von 64×64 Bildpunkten auftreten können. Dies entspricht der Überlagerung von kontrast- und detailreichen Bildbereichen.

4 Ein mathematisches Modell für die Bildüberlagerung

In diesem Kapitel wird die Fehlerverteilung bei Bildüberlagerung mit momentaner Prioritätszuteilung durch die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten bestimmt. Im Gegensatz zur Simulation, wo die zufälligen Schwankungen der untersuchten Größe - im vorliegenden Fall der Wert des Fehlers pro Bildpunkt - zur Bestimmung ihrer statistischen Verteilung nachgebildet werden, wird diese Verteilung hier direkt berechnet.

Grundlage für die Berechnung ist die genaue Kenntnis der statistischen Eigenschaften der zu verknüpfenden Zufallsgrößen und deren mathematische Formulierung. Die Untersuchung der Eigenschaften der Zufallsgrößen - der Differenz pro Bildpunkt bei den Quellbildern - wurde in Kapitel 3 durchgeführt, ihre Formulierung zu Wahrscheinlichkeitsaussagen erfolgt in diesem Kapitel. Die Wahrscheinlichkeitsaussagen sowie die in Rechenverfahren umgesetzten Ablaufprinzipien (Prioritätszuweisung, Fehlerrückkopplung) bilden das mathematische Modell der Bildüberlagerung. Da das Modell nur eine näherungsweise Beschreibung der tatsächlichen Verhältnisse bedeutet, muß auch gezeigt werden, daß es sich um eine hinreichend gute Näherung hinsichtlich der Wirklichkeitstreue der Ergebnisse handelt. Dies wird am Ende des Kapitels durch eine Gegenüberstellung von Ergebnissen der Modellrechnung mit Ergebnissen aus der Simulation des MPZ-Verfahrens getan.

4.1 Das Prinzip der Berechnung der Fehlerverteilung

Das Rechenverfahren basiert auf der folgenden Mengengleichung:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Differenzen der} \\ \text{Größe } j \text{ in den} \\ \text{Quellbildern} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Differenzen der} \\ \text{Größe } j \text{ im} \\ \text{Überlagerungsbild} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Fehler} \\ \text{der} \\ \text{Größe } j \end{array} \right\} \quad (1)$$

Die Mächtigkeiten der Mengen von Differenzen der Größe j ($j = 1, 2, \dots$) in den Quellbildern sind gegeben in Form ihrer Differenzverteilungen. Die Differenzverteilung im Überlagerungsbild, welche die Mächtigkeiten der entsprechenden Mengen bestimmt, wird im Rahmen des Modells ausgerechnet. Die Fehlerverteilung ergibt sich dann in Form der Mächtigkeiten der Mengen für die einzelnen Fehlergrößen.

Gleichung (1) berücksichtigt nicht die - im MPZ-Verfahren enthaltene - Fehlerrückkopplung. Verdrängte Differenzen werden im jeweiligen Bild zu den zeitlich folgenden Differenzen addiert. Dadurch können besonders große neue Differenzen entstehen, es können Differenzen sich ganz oder teilweise aufheben oder die verdrängte Differenz kann auf eine Nulldifferenz stoßen und erscheint in gleicher Größe erneut im Überlagerungsprozeß. Die Fehlerrückkopplung entspricht also einer Abwandlung der ursprünglichen Differenzverteilung eines Bildes. Dies kann durch das in Bild 4.1 dargestellte iterativ arbeitende Modell berücksichtigt werden. Zunächst werden die ursprünglichen Differenzverteilungen der Quellbilder gemäß einer in Abschnitt 4.3 erläuterten Prozedur modifiziert und an die Stelle der aktuellen Differenzverteilungen gesetzt. Damit wird die Differenzverteilung im Überlagerungsbild berechnet und durch Mengensubtraktion gemäß Gleichung (1) die Fehlerverteilung bestimmt. Anhand dieser Fehlerverteilung werden nun aus den ursprünglichen Differenzverteilungen durch Einflechtung der Fehler wie bereits erläutert die abgewandelten Differenzverteilungen gewonnen und an die Stelle der aktuellen Differenzverteilungen gesetzt. Dann wiederholt sich der Prozeß.

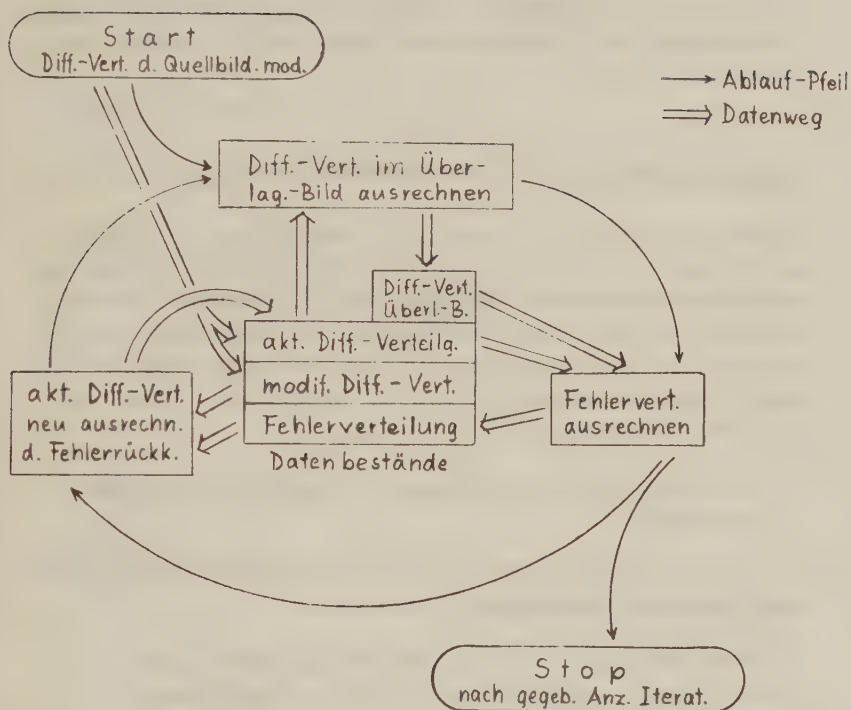


Bild 4.1 Schema des Modells der Bildüberlagerung mit Fehlerrückkopplung

Es wird also bei jedem Durchlauf die gesamte angefallene Fehlermenge in die ursprünglichen (modifizierten) Differenzverteilungen rückgekoppelt. Damit erhöht sich das "Differenzenangebot" der Quellen mit jedem Durchlauf geringfügig. Ein Bruchteil dieser Erhöhung wiederum erscheint als Fehlerzuwachs. Es erscheint plausibel, daß dieser Prozeß bereits nach wenigen Iterationen keine wesentliche Änderung der Fehlerverteilung mehr liefert. Bei der praktischen Anwendung des Rechenmodells ergab sich bereits nach der 2. Iteration eine hinreichend gute Konvergenz der Fehlerverteilung.

Als weiteres Teilergebnis liefert das Rechenmodell die Belegungsdichte der Überlagerungsbilder, welche der Kanalausnutzung beim MPZ-Verfahren entspricht.

4.2 Berechnung der Differenzverteilung im Überlagerungsbild

Die Belegungen des Überlagerungsbildes sind die Belegungen der überlagerten Einzelbilder. Treten Mehrfachbelegungen auf, so entscheidet das Prioritätskriterium, welche Belegung berücksichtigt wird. Daher ist das Prioritätskriterium ein Bestandteil des Ansatzes zur Berechnung der Differenzverteilung im Überlagerungsbild. Im vorliegenden Fall lautet das Prioritätskriterium:

"Berücksichtigung der größten Differenz bei Mehrfachbelegung".

Damit lautet die Aufgabe für die Berechnung der Differenzverteilung im Überlagerungsbild:

Berechnung der Verteilung der jeweils größten der Differenzen, welche bei n Bildquellen gleichzeitig auftreten.

Werden $m > 1$ Überlagerungsbilder bereitgestellt, so werden in der Rangfolge der nach abnehmender Größe geordneten Differenzen die vorderen m Werte berücksichtigt. Dann lautet die Aufgabe für das Überlagerungsbild Nr. j :

Berechnung der Verteilung der auf Platz j in der Rangfolge stehenden Differenz.

Die Berechnung wird zunächst ohne Berücksichtigung der in Kapitel 3 nachgewiesenen Konzentration der Differenzen größer 1 auf die Kontrastzonen durchgeführt. In Abschnitt 4.3 wird anschließend gezeigt, wie diese Konzentration zu be-

rücksichtigen ist. Es ergibt sich der folgende kombinatorische Ansatz:

1. Überlagerungsbild:

$$P \{ \hat{D} \leq X \} = P \left\{ \bigvee_i D_i \leq X \right\} \quad \hat{D} : \text{Differenz auf Platz 1 in der Rangfolge}$$

$$= \prod_{i=1}^n F_i(X) \quad D_i : \text{Differenz der Quelle } i$$

mit $F_i(X) = P \{ D_i \leq X \}$, Differenz-Verteilungsfunktion der Quelle i

$$P \{ \hat{D} = X \} = P \{ \hat{D} \leq X \} - P \{ \hat{D} \leq X-1 \}$$

$$= \prod_{i=1}^n F_i(X) - \prod_{i=1}^n F_i(X-1) \quad (2)$$

=====

2. Überlagerungsbild:

$$P \{ \hat{\hat{D}} = X \} =$$

$$= P \{ \hat{\hat{D}} > X \} \cdot P \{ \hat{\hat{M}}_1(X) \} +$$

$$+ P \{ \hat{\hat{M}}_2(X) \} \quad (3) \quad \hat{\hat{M}}_k(X) : \text{Bezeichnung des Ereignisses, daß mind. } k \text{ Differenzen in der Rangfolge, beginnend mit } \hat{\hat{D}} \text{ gleich } X \text{ sind und die restlichen kleiner } X$$

Der Ausdruck $P \{ \hat{\hat{M}}_k(X) \}$

ergibt einen sehr umfangreichen und schwer überblickbaren Formelausdruck, auf dessen Darstellung hier verzichtet wird. Dafür wird weiter unten das wesentlich übersichtlichere Schema erläutert, nach dem die Werte berechnet werden.

3. Überlagerungsbild:

$$\begin{aligned}
 P \left\{ \hat{\hat{D}} = X \right\} &= P \left\{ \hat{D}, \hat{\hat{D}} > X \right\} \cdot P \left\{ \hat{\hat{M}}_1(X) \right\} + P \left\{ \hat{D} > X \right\} \cdot P \left\{ \hat{\hat{M}}_2(X) \right\} + \\
 &+ P \left\{ \hat{\hat{M}}_3(X) \right\}
 \end{aligned}
 \quad \begin{array}{l} \hat{\hat{D}}: \text{Differenz auf} \\ \text{Platz 3 der} \\ \text{Rangfolge} \end{array}
 \quad (4)$$

Das Bauprinzip der Formel ist damit ersichtlich. Das Rechnerprogramm wurde für maximal 4 Überlagerungsbilder und 20 Quellbilder ausgeführt.

Berechnungsschema für den Ausdruck $P \left\{ \hat{\hat{M}}_k(X) \right\}$

Am Beispiel $n = 3, k = 1$ wird zunächst in Tabellenform gezeigt, welche Kombinationen von Ereignissen der Ausdruck einschließt.

Komb. Nr.	D 1	D 2	D 3
1	= X	< X	< X
2	< X	= X	< X
3	< X	< X	= X
4	= X	= X	< X
5	= X	< X	= X
6	< X	= X	= X
7	= X	= X	= X

Da jede der Differenzen aus einem anderen Quellbild kommt, müssen alle Terme einzeln berechnet werden. Die Durchführung dieser Berechnung wird durch ein Markenfeld mit $n = 20$ Plätzen gesteuert. Im Markenfeld werden die Ereigniskombinationen nacheinander durch 0 - 1-Kombinationen (Zeilen) realisiert.

Bild 4.2 zeigt das Schema.

	i =	1	2	3	4		$(n'-1)n'$			
z =	1	0	0	1	1	...	1	1		
	2	0	1	0	1	...	1	1		
	⋮	...								
	⋮	0	1	1	1	...	1	0		
	⋮	1	0	0	1	...	1	1		
	⋮	1	0	1	0		1	1		
	⋮	...								
	⋮	1	0	1	1	...	1	0		
	⋮	...								
	⋮	1	1	1	1		1	0	0	
	⋮	0	0	0	1	...	1	1	1	
	⋮	0	0	1	0	...	1	1	1	
	⋮	...								
	⋮	1	1	1	1	...	1	0	0	0
	⋮	0	0	0	0	...	1	1	1	1
	⋮	...								
	⋮	1	0	0	0	...	0	0	0	0
	⋮	0	0	0	0	...	0	0	0	0

2 Diff. = X

3 Diff. = X

4 Diff. = X

19 Diff. = X

20 Diff. = X

0 bedeutet: $D_i = X$, $p_i = F_i(X) - F_i(X-1)$

1 bedeutet: $D_i < X$, $p_i = F_i(X-1)$

$$\text{Term } z: P_z = \prod_{i=1}^n p_i$$

n' : Anzahl der beteiligten Bilder

Bild 4.2 Schema zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für die Differenzkombinationen des Ereignisses $\hat{M}_2(X)$

Der Berechnung gemäß Bild 4.2 liegt die Untermenge von n' Bildquellen zugrunde, in der diejenigen Quellen fehlen, für welche gleichzeitig gilt " $D_i > X$ ". Das bedeutet, daß z. B. der

Ausdruck

$$P \{ \hat{D} > X \} \cdot P \{ \hat{M}_1(X) \}$$

durch eine Summe solcher Produkte verwirklicht wird, in deren Verlauf jede der Quellen einmal im ersten Term erscheint und gleichzeitig im zweiten Term ausgeschlossen ist.

Die Berechnung der Terme in Bild 4.2 erfordert mit zunehmender Anzahl von Quellen eine große Anzahl von Multiplikationen im Rechner. Da die Anzahl der Terme ebenfalls mit der Anzahl der Quellen stark zunimmt, werden sehr lange Rechenzeiten benötigt. Im Programm ist daher eine Vorkehrung zur Abkürzung der Rechnung durch Vernachlässigung der Terme mit höherer Anzahl gleicher Differenzen getroffen.

4.3 Berücksichtigung der örtlichen Häufung großer Differenzen in den Kontrastzonen

In Kapitel 3 wurde gezeigt, daß Differenzen größer 1 nicht regellos über die Bildfläche verteilt auftreten, sondern überwiegend konzentriert in den Kontrastzonen. Daher treffen in Mehrfachbelegungen Differenzen größer 1 praktisch nur dort zusammen, wo sich die Kontrastzonen von mindestens 2 Bildern überlappen. Da die Konzentration der Differenzen größer 1 auf Kontrastzonen der regellosen Verteilung widerspricht, muß untersucht werden, welche Auswirkung dies auf die in Abschnitt 4.2 durchgeführte Berechnung der Differenzverteilung im Überlagerungsbild hat. Die Betrachtung wird am Beispiel der Überlagerung zweier Bilder mit Berechnung der Wahrscheinlichkeit für Fehler größer 1 durchgeführt. Es gilt:

$$P \{ F > 1 \} = P(K1) \cdot P(K2|K1) \cdot P \{ D1 > 1 | K1 \} \cdot P \{ D2 > 1 | K2 \} \quad (5)$$

mit $\{ F > 1 \}$: "Fehler größer 1"

$P(K1)$: Wahrsch. für Kontrastzone in Bild 1

$P(K2|K1)$: bedingte Wahrsch. für Kontrastzone in Bild 2, wenn in Bild 1 Kontrastzone vorliegt.

Für die bedingten Differenzwahrscheinlichkeiten gilt wegen der Häufung der Differenzen größer 1 in den Kontrastzonen:

$$P \{ D_i > 1 | K_i \} = \frac{P \{ D_i > 1, K_i \}}{P(K_i)} \approx \frac{P \{ D_i > 1 \}}{P(K_i)} \quad (6)$$

Aus (5) folgt mit (6):

$$P \{ F > 1 \} = P(K_1) \cdot P(K_2 | K_1) \cdot \frac{P \{ D_1 > 1 \}}{P(K_1)} \cdot \frac{P \{ D_2 > 1 \}}{P(K_2)} \quad (7)$$

Durch Auszählung der von Kontrastzonen überdeckten Bildbereiche anhand von Bild 3.6 wird gezeigt, daß für jedes Bildpaar ein gemeinsamer Teilbereich K' existiert, in welchem bei beiden beteiligten Bildern praktisch alle Differenzen größer 1 liegen. Der Teilbereich K' dient als Bezugsbereich für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Fehlern größer 1. Aus Gleichung (7) folgt

$$P \{ F > 1 \} = P(K') \cdot \frac{P \{ D_1 > 1 \}}{P(K')} \cdot \frac{P \{ D_2 > 1 \}}{P(K')} \quad (8)$$

$$= \frac{P \{ D_1 > 1 \}}{\sqrt{P(K')}} \cdot \frac{P \{ D_2 > 1 \}}{\sqrt{P(K')}} \cdot$$

$$= P' \{ D_1 > 1 \} \cdot P' \{ D_2 > 1 \}$$

$$\text{mit } P' \{ D_i > 1 \} = \frac{P \{ D_i > 1 \}}{\sqrt{P(K')}} \quad (9)$$

Damit ist gezeigt, daß der Fall der örtlich konzentrierten Differenzen größer 1 hinsichtlich der Fehler größer 1 dem regellosen Fall mit modifizierten Wahrscheinlichkeiten entspricht.

Für den Fall, daß bei Überlagerung von 3 Bildern 3 Differenzen größer 1 zusammentreffen, ergibt sich aus Gleichung (8) mit dem für 3 Bilder zu bestimmenden Teilbereich K'' :

$$P \{ F F > 1 \} = P(K'') \cdot \frac{P \{ D_1 > 1 \}}{P(K'')} \cdot \frac{P \{ D_2 > 1 \}}{P(K'')} \cdot \frac{P \{ D_3 > 1 \}}{P(K'')}$$

mit $P \{ FF > 1 \} = \text{Wahrsch., daß gleichzeitig}$
 2 Fehler größer 1 auftreten.

Die entsprechende Modifikation der Wahrscheinlichkeiten lautet:

$$P'' \{ D_i > 1 \} = \frac{P \{ D_i > 1 \}}{\sqrt[3]{P(K'')^2}} \quad .$$

Da der Fall des Zusammentreffens von 3 Differenzen größer 1 sehr selten ist und außerdem der Teilbereich K'' größer als K' sein wird, so daß

$$P(K'') > P(K')$$

ist, dürfte die Näherungsannahme

$$P'' \{ D_i > 1 \} \approx P' \{ D_i > 1 \}$$

keine wesentliche Verfälschung der Rechenergebnisse zur Folge haben und wird daher dem weiteren Verlauf der Berechnung zugrunde gelegt.

Die Ausdehnung des Teilbereichs K' wird anhand von Bild 3.6 folgendermaßen ermittelt:

Jeweils für Bildpaare wird die Anzahl von Teilflächen festgestellt, welche in mindestens einem der beiden Bilder markiert sind. Anschließend wird diese Zahl so vermindert, daß von jedem der Bilder noch 90 % der markierten Teilflächen¹⁾ erfaßt sind. Diese verbliebene Teilflächenzahl wird auf die

1) In Hinblick auf die relativ grobe Bildeinteilung und die pauschale Definition der Kontrastzone durch "Effektivwert der Differenz größer 1" erscheint eine reduzierte Genauigkeit an dieser Stelle angemessen und wird später durch die Ergebnisse der Fehlerwahrscheinlichkeitsberechnung bestätigt.

Gesamtbildfläche normiert und in Prozent angegeben. Das Resultat zeigt folgende Tabelle

Bildpaar	Playboy Strohhutd.	Playboy Küche	Playboy Dürerhs.	Strohhutd. Dürerhs.	Strohhutd. Küche	Dürerhs. Küche	Mittel- wert
%	52	56	65	56	51	57	56

Es wird also festgestellt:

$$P(K') = 0,56, \quad \sqrt{P(K')} = 0,75.$$

Durch die Modifikation der Wahrscheinlichkeiten für Differenzen größer 1 gemäß Gleichung (9) würde die Belegungsdichte über K' erhöht. Das ist jedoch nicht begründet, da K' in den einzelnen Bildern auch "ruhige" Zonen einschließt. Deshalb wird die Wahrscheinlichkeit für Differenzen der Größe 1 um die Summe der Erhöhungsbeträge für die übrigen Differenzen gekürzt. Daraus ergibt sich folgende Rechenvorschrift für die Modifikation der Differenzverteilung:

$$\begin{aligned} P' \{ D_i = 1 \} &= P \{ D_i = 1 \} - 0,33 \cdot P \{ D_i > 1 \} \\ P' \{ D_i = j \} &= P \{ D_i = j \} \cdot 1,33 \quad \text{für } j = 2, 3 \dots \end{aligned} \quad (10)$$

Die Auswirkung dieser Maßnahme auf die Wahrscheinlichkeit für Fehler der Größe 1 wird im folgenden diskutiert.

Für die Wahrscheinlichkeit $P_1(f1)$ von Fehlern der Größe 1, welche durch ein Bild mit der Nummer 2 in einem Bild mit der Nummer 1 erzeugt werden, gilt:

$$\begin{aligned} P_1(f1) &= P_1(d1) \cdot \left(\frac{1}{2} P_2(d1) + P \{ D_2 > 1 \} \right) \\ \text{mit } P_1(dj) &= P \{ D_1 = j \} \end{aligned} \quad (11)$$

Die tatsächliche Rechnung mit den modifizierten Wahrscheinlichkeiten gemäß (10) ergibt jedoch:

$$\begin{aligned}
 P_1^*(f1) &= P_1^1(d1) \cdot \left(\frac{1}{2} P_2^1(d1) + P^1\{D2 > 1\} \right) \\
 &= (P_1(d1) - 0,33 \cdot P\{D1 > 1\}) \cdot \left(\frac{1}{2} (P_2(d1) - 0,33 \cdot \right. \\
 &\quad \left. \cdot P\{D2 > 1\}) + 1,33 \cdot P\{D2 > 1\} \right) \\
 &= P_1(d1) \cdot (1 - 0,33 \frac{P\{D1 > 1\}}{P_1(d1)}) \cdot \left(\frac{1}{2} P_2(d1) + \right. \\
 &\quad \left. + P\{D2 > 1\} + \underbrace{\frac{0,33}{2} P\{D2 > 1\}}_{\ll \frac{1}{2} P_2(d1)} \right) \\
 &\approx P_1(f1) \cdot (1 - 0,33 \frac{P\{D1 > 1\}}{P_1(d1)})
 \end{aligned}$$

Die Wahrscheinlichkeit für Fehler der Größe 1 muß also am Ende der Rechnung korrigiert werden:

$$\begin{aligned}
 P_1(f1) &= P_1^*(f1) \frac{1}{(1 - 0,33 \frac{P\{D1 > 1\}}{P_1(d1)})} . \\
 &= P_1^*(f1) \cdot (1 + 0,25 \cdot \frac{P\{D1 > 1\}}{P_1(d1)}) . \\
 &=====
 \end{aligned}$$

4.4 Die Fehlerrückkopplung

Wie in Abschnitt 4.1 bereits erwähnt, bedeutet Fehlerrückkopplung die Addition einer verdrängten Differenz zur zeitlich nachfolgenden Differenz. Dadurch wird die aktuelle Differenzverteilung abgewandelt.

Betrachtet werde die Menge der Belegungen mit der Differenz d_j in Bild 1, deren Wahrscheinlichkeit $P_1(d_j)$ lautet. Die Ab-

Die Ermittlung der Fehler der Größe j gemäß Gleichung (1) erfolgt nicht nach Quellbildern getrennt. Daher werden die Fehleranteile der Größe j auf die Quellbilder entsprechend ihrem Gehalt an Differenzen der Größe j verteilt.

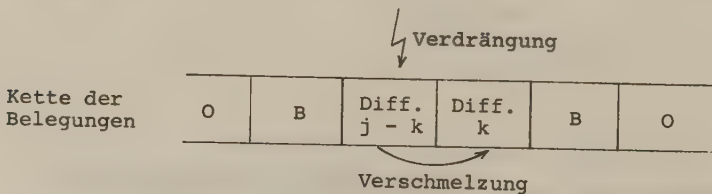
Der Formelausdruck für den Differenzenabgang (Differenz dj , Bild i) lautet somit

$$P_i \{ \text{Abgang } dj \} = P_i(dj) \cdot P_{KR} \cdot P_i(F)$$

$P_i(dj)$: Wahrsch. für Diff.
der Größe j in Bild i

$P_i(F)$: Wahrsch. für Fehler
im Bild i

Beim Differenzenzugang durch Verschmelzung sind alle Paarungen aufeinanderfolgender Differenzen zu berücksichtigen, welche den Wert j ergeben. Folgendes Schema erläutert den Aufbau der Formel



$$P_i \{ \text{Zugang } dj, \text{ Verschmelzg.} \} = \sum_{\substack{k=-d_{\max} \\ k \neq 0 \\ k+j}}^{d_{\max}} P_i(dk) \cdot P_{KR} \cdot P_i(d(j-k) | D_i > 0) \cdot P_i(f(j-k) | d(j-k)) \cdot F_V(j, k)$$

$d_{\max}$: maximaler Differenzwert

$P_i(f(j-k) | d(j-k))$: bedingte Wahrsch. für Fehler der Größe $(j-k)$, wenn eine Differenz der Größe $(j-k)$ vorliegt

$F_V(j, k)$: Vorzeichen-Faktor in Abhängigkeit von j und k

Der Vorzeichen-Faktor F_V berücksichtigt die Tatsache, daß in Bildern häufiger Differenzen gleichen Vorzeichens aufeinander folgen als solche ungleichen Vorzeichens. Die Ergebnisse einer entsprechenden Untersuchung (Abschnitt 3.2) ergaben im Mittel die Werte

$$\begin{aligned} \text{gleiches Vorzeichen: } F_V(j,k) &= 0,59 \quad \text{mit } k < j \text{ und gleiches} \\ &\hspace{15em} \text{Vorzeichen} \\ \text{Vorzeichenwechsel : } F_V(j,k) &= 0,41 \quad \text{mit } k, j \text{ ungleiches} \\ &\hspace{15em} \text{Vorzeichen.} \end{aligned}$$

Für den Differenzenzugang durch Verdrängung am Kettenende (KE) ergibt sich der Formelausdruck

$$P_i \{ \text{Zugang } dj, KE \} = P_i(dj) \cdot P\{KE\} \cdot P_i(fj|dj)$$

$$\text{mit } P\{KE\} = \frac{\text{Anz. Ketten}}{\text{Anz. Belegg.}} = 1 - P_{KR}$$

$$P_i \{ \text{Zugang } dj, KE \} = P_i(dj) \cdot (1 - P_{KR}) \cdot P_i(fj|dj)$$

4.5 Vergleich von Modellrechnung und Simulation

Zur Bestätigung der Gültigkeit des abgeleiteten Rechenmodells werden in diesem Abschnitt die theoretisch berechneten Fehlerverteilungen und Überlagerungsbild-Belegungsdichten den Ergebnissen der Simulation gegenübergestellt.

Für die Berechnung der Vertrauensbereiche gilt:

Das statistische Experiment besteht in der Feststellung der Anzahl n derjenigen Proben, welche bei N Versuchen mit voneinander unabhängigem Ausgang das gewünschte Merkmal ergeben. Dann gilt für die Verteilung der Anzahlen n die Binomialverteilung. Die Vertrauensbereiche werden nach der in [18, S.33] angegebenen Methode berechnet (Vertrauensintervall der Wahrscheinlichkeit p einer Binomialverteilung).

Bei Vorgabe einer statistischen Aussagesicherheit von 95 % ergeben sich die Intervallgrenzen g_u (untere Grenze) und g_o (obere Grenze) zu

$$g_u = \frac{n}{n + (N-n+1) \cdot F_u} \quad \text{mit } F_u = F_{f1 \ f2} (95 \%) \text{ Wert der F-Verteilung}$$

$$f1 = 2 \cdot (N-n+1)$$

$$f2 = 2n$$

$$g_o = \frac{(n+1) \cdot F_o}{(N-n) + (n+1) \cdot F_o} \quad \text{mit } F_o = F_{f1 \ f2} (95 \%)$$

$$f1 = 2 \cdot (n+1)$$

$$f2 = 2 \cdot (N-n)$$

Das "gewünschte" Merkmal im Fall der Simulation des MPZ-Verfahrens ist ein Fehler der Größe j . Die Unabhängigkeit der Proben voneinander wird dadurch erreicht, daß die Proben im Abstand von 8 Bildpunkten in Zeilenrichtung entnommen werden.

In Bild 4.3 sind einige Beispiele für theoretisch berechnete Fehlerverteilungen dargestellt. Zum Vergleich sind die entsprechenden Simulationsergebnisse mit Vertrauensintervallen eingetragen. Die Vertrauensintervalle überdecken nicht in jedem Fall den theoretisch berechneten Wert. Das läßt auf die Existenz gewisser systembedingter Abweichungen schließen, welche auf kaum vermeidbare Ungenauigkeiten bei der theoretischen Erfassung der Bildquelle zurückgehen dürften. Trotzdem kann gute Übereinstimmung von theoretisch berechneten Werten und Simulationsergebnissen festgestellt werden.

Für die Belegungsdichte im Überlagerungsbild liegen Simulationsergebnisse nur für Konfigurationen mit 1 Überlagerungsbild vor. Die Berechnung der Vertrauensintervalle ergab die Spannweite ≈ 0 . Daher sind die Werte in der folgenden Tabel-

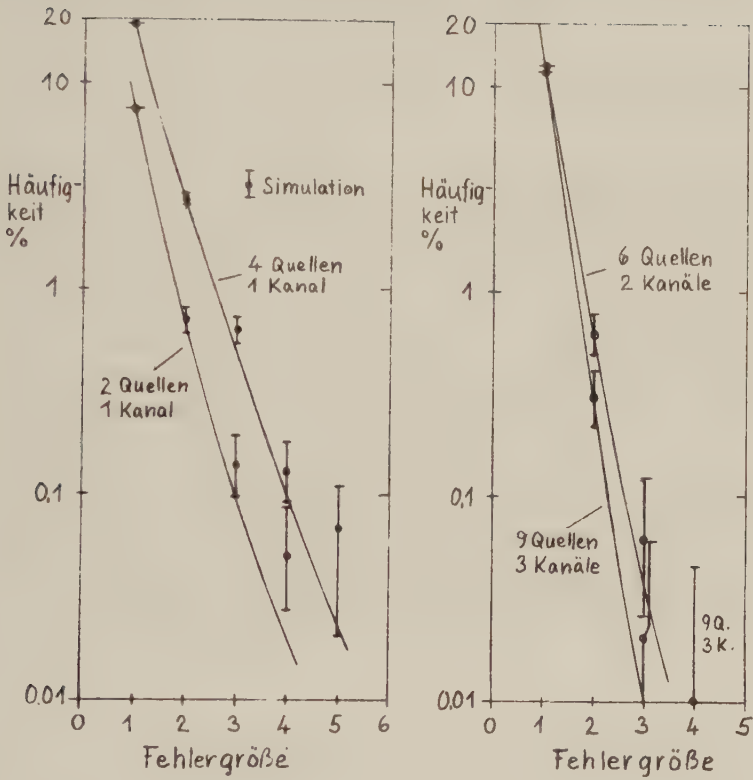


Bild 4.3 Theoretisch berechnete Fehlerverteilungen zum Vergleich mit Simulationswerten, Vertrauensintervalle für 95 % statistische Aussagesicherheit

le gegenübergestellt. Auch hier ist gute Übereinstimmung der theoretischen Werte mit Fehlerrückkopplung und der Simulations-Werte vorhanden. Zusätzlich sind noch Modellwerte ohne

Belegungsdichte im Überlagerungsbild	2 Quellen	3 Quellen	4 Quellen
Modell mit Fehlerrückkopplung	63 %	81 %	90 %
Modell ohne Fehlerrückkopplung	61 %	76 %	85 %
Simulation	60 %	81 %	88 %

Fehlerrückkopplung angegeben, welche nach der Binomialverteilung bei gemittelter Belegungsdichte der beteiligten Quellen laut Bild 3.2 berechnet sind. An ihnen ist zu erkennen, daß sich die Fehlerrückkopplung hinsichtlich der Belegungsdichte des Überlagerungsbildes erst bei hoher Fehlerhäufigkeit deutlich bemerkbar macht. Der Vorteil dieser Werte besteht darin, daß sie im Vergleich zum Modell mit Fehlerrückkopplung wesentlich weniger Rechenaufwand kosten.

5 Die Wirksamkeit der Bildüberlagerung als wirtschaftliche

Quellencodierung

Überblick

Die Wirtschaftlichkeit der Bildüberlagerung als Quellencodierung besteht in der Konzentration mehrerer Quellbilder zu einem Überlagerungsbild. Da die Wirtschaftlichkeit nur so lange erhalten bleibt, wie das betrachtete Verfahren seinen Zweck, die Codierung von Bildern unter Einhaltung eines Kriteriums für die Originaltreue, erfüllt, wird in diesem Kapitel die Wechselbeziehung zwischen Konzentrationsverhältnis und Bildbeeinträchtigung analysiert.

In Abschnitt 5.1 wird die Wirksamkeit der Bildüberlagerung aus der Sicht der mathematischen Statistik betrachtet. In Abschnitt 5.2 werden die durch Überlagerung in den Quellbildern erzeugten Bildpunktfehler unter verschiedenen Gesichtspunkten diskutiert. In Abschnitt 5.3 werden die gewonnenen Erkenntnisse zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit des MPZ-Verfahrens verwendet.

Bei der Interpretation des Konzentrationsverhältnisses von Quellen zu Überlagerungsbildern ist zu beachten, daß bei der Bildüberlagerung die Anteile der einzelnen Quellen spezifisch gekennzeichnet werden müssen, um die Rekonstruktion zu ermöglichen. Jedem Bildpunkt des Überlagerungsbildes ist daher ein Adreßcode zugeordnet, welcher die Nummer der Quelle angibt, zu der der Bildpunkt gehört. Er wirkt wie ein fester Zuschlag zu der pro Bildpunkt benötigten Codewortlänge. Die Untersuchung seines Einflusses kann daher von der Untersuchung der Bild-Konzentrationsverhältnisse abgetrennt werden. Die angegebenen Konzentrationsverhältnisse

beziehen sich rein auf die Anzahl der überlagerten Quellbilder. Die Adreßcodierung wird in Abschnitt 5.3 erörtert.

Der Grad der Beeinträchtigung der Bildgüte wird im allgemeinen durch das Urteil eines subjektiven Beobachters festgestellt. Der subjektive Beobachter prüft, ob Verfälschungen gegenüber dem Original erkennbar sind bzw. toleriert werden können, und gibt der vorgelegten Bildprobe eine Note anhand einer Bewertungsskala [22]. Objektive Kriterien zur Beurteilung der Bildgüte auf der Grundlage meßbarer Fehler-Kennwerte sind als gleichwertig mit der subjektiven Beurteilung anzusehen - insbesondere bei Vergleichsaussagen -, wenn gewährleistet ist, daß die Auswirkungen der Bildfehler auf den Gesamteindruck des Bildes in zutreffender Weise erfaßt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden Vergleichsaussagen anhand objektiver Kriterien gemacht, denen die genaue Kenntnis der verfahrensspezifischen Fehlerauswirkungen zugrunde liegt. Die Ergebnisse werden durch Rechnung nach dem in Kapitel 4 abgeleiteten Verfahren und, soweit sie sich auf Bildausschnitte beziehen, durch Simulation des MPZ-Verfahrens auf dem Rechner gewonnen.

Da in die theoretische Berechnung nur die Differenzverteilung der Bilder, nicht aber die durch den Bildinhalt gegebene Struktur, eingeht, wird durch mehrfache Verwendung der gleichen Differenzverteilung die Überlagerung mehrerer von der Statistik her gleich gearteter Bilder realisiert. Auf diese Weise ist es möglich, im Rahmen der durch den Satz der 4 Bildvorlagen gegebenen Typenmischung auch Quellenzahlen größer 4 zu untersuchen. Bei der Simulation wird der entsprechende Effekt dadurch erreicht, daß die Zeilenkombinationen, mit denen die Überlagerung durchgeführt wird, zufallsmäßig aus den Bildern ausgewählt werden.

In Konfigurationen mit mehreren Überlagerungsbildern wird stets zuerst das 1. Überlagerungsbild aufgefüllt und danach die folgenden.

5.1 Die statistische Wirksamkeit des Überlagerungsprinzips

Die statistische Wirkung der Überlagerung unabhängiger Zufallsvariablen besteht darin, daß die Summe der Zufallsvariablen, bezogen auf ihren Mittelwert, geringeren Schwankungen unterliegt als die Einzelwerte, jeweils auf den Mittelwert bezogen. Dieser Sachverhalt wird durch den Variationskoeffizienten σ/μ einer Zufallsvariablen beschrieben, für den gilt:

$$\frac{\sigma_{\text{ges.}}}{\mu_{\text{ges.}}} = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2}}{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n}$$

σ_i^2 : Varianz der Zufallsvariablen i
 μ_i : Erwartungswert der Zufallsvariablen i

Insbesondere ergibt sich für

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_n = \sigma$$

und $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n = \mu$

$$\frac{\sigma_{\text{ges.}}}{\mu_{\text{ges.}}} = \frac{\sqrt{n \cdot \sigma^2}}{n \cdot \mu} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \frac{\sigma}{\mu}$$

Der Variationskoeffizient nimmt also bei zunehmendem n mit dem Faktor $1/\sqrt{n}$ ab und strebt insbesondere für $n \rightarrow \infty$ gegen 0, d. h. die Summe der Zufallsvariablen schwankt praktisch nicht mehr. Ein bekanntes Beispiel für die Ausnutzung dieser Gesetzmäßigkeit ist die Dimensionierung der Leitungszahlen im Fernspreverkehr. Für zwei unterschiedliche Verkehrsströme werden z. B. folgende Leitungszahlen benötigt [15]:

Verkehr A, im Mittel 10 Leitungen gleichzeitig belegt,
gesamt 18 Leitungen

Verkehr B, im Mittel 100 Leitungen gleichzeitig belegt,
gesamt 120 Leitungen

(Verlust 1 % in beiden Fällen).

Bei Verkehr A müssen 80 % des Mittelwertes für Schwankungen zusätzlich bereitgestellt werden, bei Verkehr B nur 20 %. (Die Zahlen gelten für Bündel mit vollkommener Erreichbarkeit.)

Bei Bildern sind "Leitungszahlen" von 1, 2, 3 usw. interessant, d. h. die statistische Wirksamkeit der Überlagerung auf 1, 2 oder 3 Überlagerungsbildern ist zu untersuchen. Hierfür empfiehlt sich nicht die Betrachtung der benötigten "Leitungszahl", sondern der Annäherung der Fehlerhäufigkeit an die durch die effektive Systemüberlastung gegebene Mindest-Fehlerwahrscheinlichkeit bei gegebener "Leitungszahl". Bild 5.1 zeigt diese Darstellung für verschiedene Konzentrationsverhältnisse. Für die Systemüberlastung gilt:

$$\text{Systemüberlastung} = \frac{\text{Summe der Belegungsdichten}}{\text{gesamt in \%}} - \frac{\text{Anzahl der Überlagerungsbilder} \times 100 \%}{\text{der Quellen in \%}}$$

Teilt man die so berechnete Systemüberlastung durch die Anzahl der Quellen, dann ergibt sich die theoretische Mindest-Fehlerwahrscheinlichkeit. Für die Konzentration 2:1 kommt ein negativer Wert heraus, sinnvoll ist dagegen der Wert 0.

Man sieht, daß mit der ersten Systemverdoppelung, d. h. Übergang von 2 auf 4 Quellen im Fall 2:1 usw. die größte Verbesserung hinsichtlich der Fehlerhäufigkeit erzielt wird. Außerdem muß festgestellt werden, daß der berechnete Grenzwert nach der ersten Systemverdoppelung noch mit dem Faktor 2,9 bei der Konzentration 3:1 und mit dem Faktor 1,7 bei der Konzentration 4:1 überschritten wird. Die Konzentration 4:1 erweist sich also hinsichtlich der Statistik als günstig. Die praktische Beurteilung muß jedoch anhand des Absolutwertes der Fehlerhäufigkeit erfolgen, der hier fast doppelt so hoch ist wie bei der Konzentration 3:1. Außerdem ist, wie weiter hinten ausführlich beschrieben, die Größe der Fehler von Bedeutung.

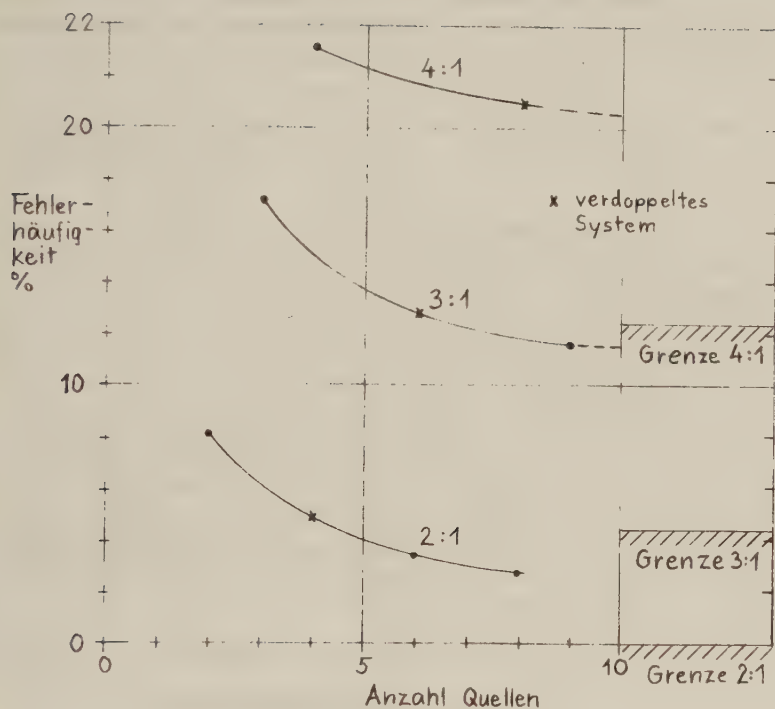


Bild 5.1 Fehlerhäufigkeit pro Bildpunkt und Mindest-Fehlerwahrscheinlichkeit, Parameter: Konzentrationsverhältnis (hervorgehobene Kurvenpunkte entsprechen realen Konfigurationen)

Die Belegungsdichte der Überlagerungsbilder wird mit Ausnahme des durch hohe Fehlerhäufigkeit gekennzeichneten Falles von nur einem Überlagerungsbild nach der Binomialverteilung berechnet. Dies folgt aus der Gegenüberstellung von Überlagerungsbild - Belegungsdichten mit und ohne Fehlerrückkopplung am Ende des Abschnitts 4.5. Für die Binomialverteilung wird die mittlere Belegungsdichte zu $p = 0,38$ als Mittelwert über die Bildvorlagen laut Bild 3.2 angenommen.

Bild 5.2 zeigt das Ergebnis. Die Belegungsdichte der einzelnen Überlagerungsbilder spiegelt das Verfahren ihrer Auffül-

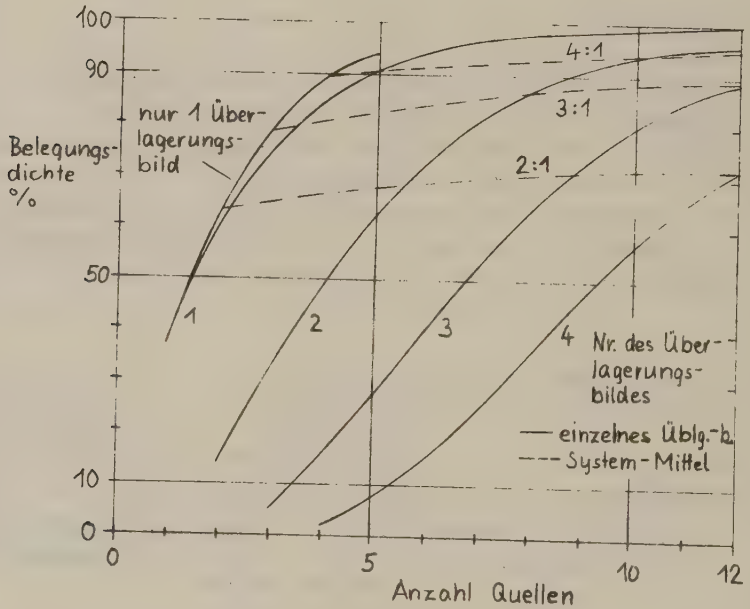


Bild 5.2 Belegungsdichte der Überlagerungsbilder einzeln und im Mittel

Parameter: Konzentrationsverhältnis,
Nummer des Überlagerungsbildes

lung (zuerst Bild 1 usw.) wieder. Für andere Auffüllungsmodi, etwa in Zusammenhang mit einer speziellen Adreßcodierung, welche bestimmte Quellen bestimmten Überlagerungsbildern fest zuweist, sind andere Einzelverteilungen zu erwarten. Wesentlich ist jedoch die gestrichelt eingezeichnete mittlere Belegungsdichte bezüglich festem Konzentrationsverhältnis, da ihr Wert praktisch unabhängig vom Auffüllmodus ist.

Diese mittlere Belegungsdichte zeigt, daß die mittlere Kanalausnutzung des MPZ-Verfahrens beim Übergang von einem auf zwei Kanäle am deutlichsten zunimmt und dabei bereits etwa 50 % der insgesamt möglichen Steigerung erfährt. Aus dieser Sicht erscheint es daher nicht zweckmäßig, Systeme mit mehr als 2 Kanälen zu realisieren.

5.2 Diskussion der Fehler durch Mehrfachbelegungen

In diesem Abschnitt werden die Fehler durch Mehrfachbelegungen im Überlagerungsbild anhand von Fehlerstatistiken diskutiert. Grundsätzlich ist festzustellen, daß Fehler nur in Belegungen auftreten, d. h. dort, wo der Grauton des Bildes sich ändert (insbesondere an Konturen). Diese Eigenschaft wirkt sich ungünstig aus, da der Betrachter sich auf die Konturen im Bild konzentriert. Auf den Gesamteindruck des Bildes wirkt es sich günstig aus, daß die Fehler relativ zum örtlichen Kontrast etwa konstant bleiben.

Folgende Gesichtspunkte werden betrachtet:

- Verteilung der Fehlergrößen,
- Leistungsbeiträge der einzelnen Fehlergrößen,
- örtliche Verminderung des Störabstandes.

Die Verteilung der Fehlergrößen ist geprägt durch die bei Mehrfachbelegungen angewendete Prioritätsskala. Den vorliegenden Untersuchungen liegt das Prinzip der Berücksichtigung der jeweils größten Differenz zugrunde. Dies führt zum größten Anteil von Fehlern der Größe 1. Bei pseudozufälliger Prioritätszuteilung, wie sie z. B. in [11] angewendet wird, wird durch die Fehlerverteilung die Differenzverteilung des Bildes reproduziert, da der Vorgang der Verdrängung einer

Differenz wie eine Stichprobenentnahme aus dem betreffenden Bild wirkt. Eine weitere Möglichkeit für eine Prioritätsskala bestünde darin, die Priorität anhand der auf das jeweilige örtliche Kontrastniveau bezogenen Differenzen zu bestimmen. Auch hier würde als Fehlerverteilung näherungsweise die Differenzverteilung des betreffenden Bildes reproduziert.

Bild 5.3 zeigt die auf den Fehlerfall bezogene Verteilung der Fehlergrößen in Abhängigkeit von der Quellenzahl für die Fehler der Größe 1, 2 und 3 Quantisierungsstufen. (Die Absolutwerte der Fehlerhäufigkeit wurden in Bild 5.1 dargestellt) Man erkennt deutlich die Verlagerung der Fehlerhäufigkeit zum Fehler 1 hin mit zunehmender Quellenzahl. Da jedoch die Fehlerhäufigkeit mit zunehmender Quellenzahl insgesamt deutlich abnimmt, nehmen auch die Fehler der Größe 1 noch ab. Dies ist durch die gestrichelten Linien angedeutet, welche den Verlauf der absoluten Häufigkeit des Fehlers 1, bezogen auf die Gesamtfehlerhäufigkeit bei 1 Überlagerungsbild, wiedergeben.

Es ist also festzustellen, daß mit zunehmender Quellenzahl die Beeinträchtigung der Bildgüte durch große Fehler stark abnimmt, woraus folgt, daß Konturen nicht mehr gestört werden. Wegen der Abnahme der Gesamtfehlerhäufigkeit nehmen auch die Fehler der Größe 1 ab. Beachtet man die nichtlineare Teilung der Häufigkeitsskala von Bild 5.3, so stellt man weiterhin fest, daß die erste Systemverdoppelung den stärksten Beitrag liefert.

Eine anschauliche Vorstellung vom Gewicht der Überlagerungsfehler liefert der Vergleich der Leistungen des Fehlersignals und des Nutzsignals. Als Nutzsignal wird die Differenzenleistung der Bildquelle betrachtet. In Bild 5.4 ist die bei der Überlagerung erzeugte Fehlerleistung zur Differenzenleistung der beteiligten Quellen ins Verhältnis gesetzt und in % aufgetragen.

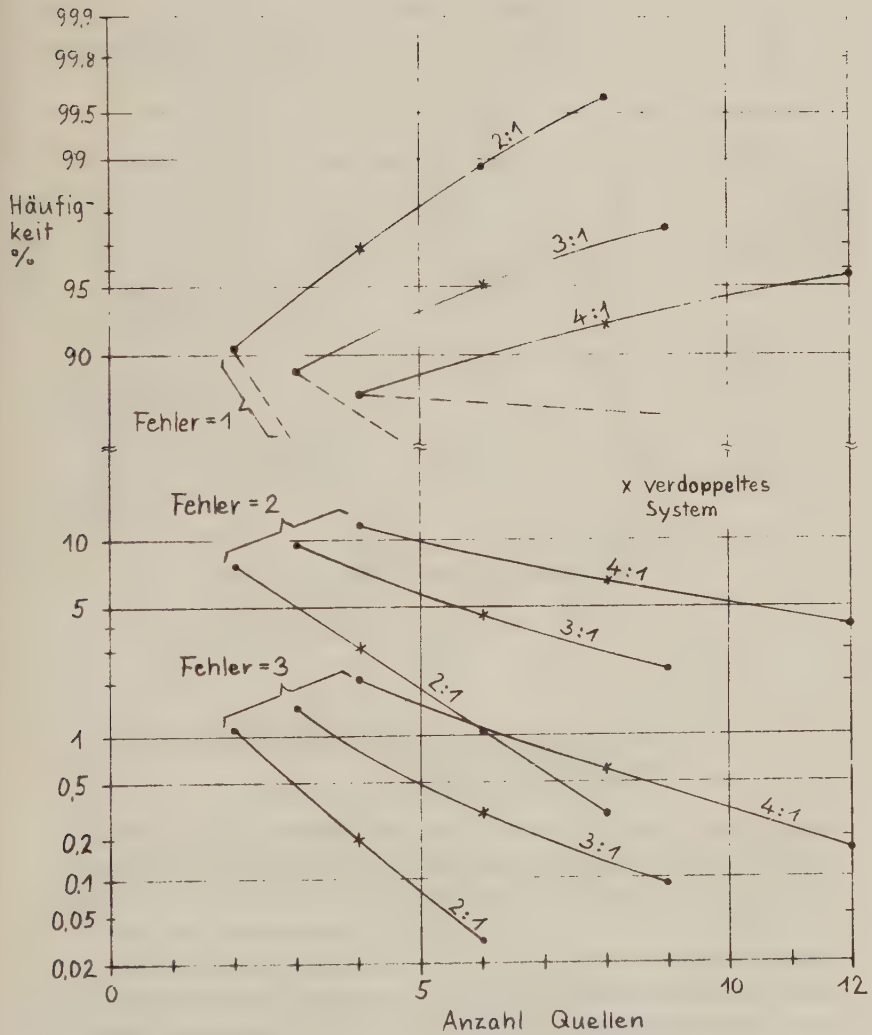


Bild 5.3 Häufigkeitsverteilung der Fehler von der Größe 1, 2 und 3 Quantisierungsstufen
Parameter: Konzentrationsverhältnis
(hervorgehobene Kurvenpunkte entsprechen realen Konfigurationen)

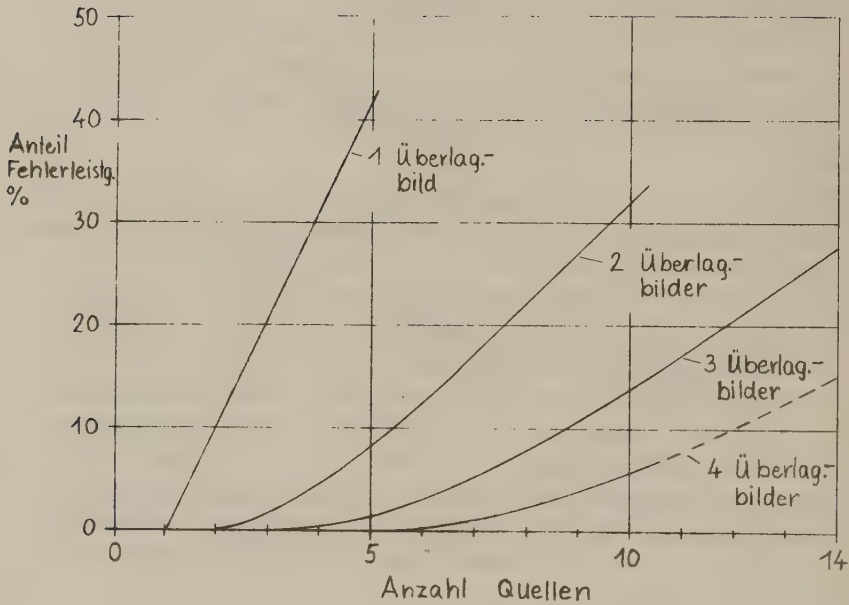


Bild 5.4 Fehlerleistung in Prozent der Differenzenleistung der Quellen

Man erkennt, daß bei festgehaltenem Prozentsatz der Fehlerleistung die Anzahl der überlagerten Quellen mit größerem Verhältnis zunimmt als die Anzahl der benötigten Überlagerungsbilder. Dies ist eine weitere Äußerungsform der Tatsache, daß mit zunehmender Quellenzahl die Fehlerhäufigkeit insgesamt abnimmt, und daß die großen Fehler dabei überverhältnismäßig abnehmen. Aus Bild 5.4 kann auch abgelesen werden, daß die bei der Konzentration 4:1 mit 1 Überlagerungsbild insgesamt erzeugte Fehlerleistung das 1,28-fache ($= 4 \times 0,32$) der Differenzenleistung eines Quellbildes ausmacht.

Die Beiträge der einzelnen Fehlergrößen zur gesamten Fehlerleistung zeigt Bild 5.5. Es ist deutlich zu erkennen, daß

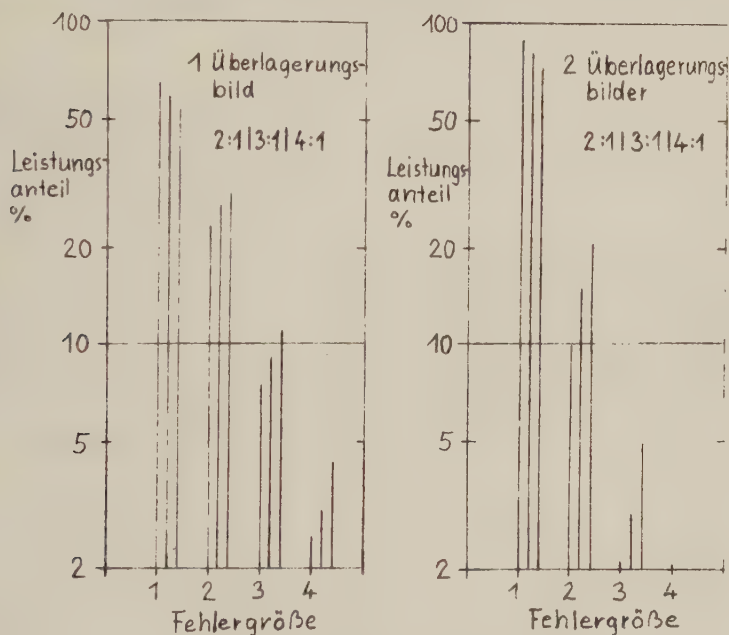


Bild 5.5 Verteilung der Fehlerleistungen

die Beiträge der größeren Fehler beim verdoppelten System (rechtes Diagramm) kleiner sind als beim einfachen System.

Die folgende Betrachtung gibt Aufschluß über die Verteilung der Fehler auf die mehr oder weniger detail- und kontrastreichen Zonen der Bilder. Dazu wird eine Vergleichszahl mit der Bezeichnung "Störabstands-Änderung" berechnet. Für den Störabstand gilt:

$$V = 10 \cdot \lg \frac{N_V}{N_Q + N_Z} \text{ dB} = 10 \cdot \lg \frac{N_V}{N_Q} \text{ dB} - 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{N_Z}{N_Q}\right) \text{ dB}$$

Störabstand
Störabstands-
nach Quanti-
Änderung
sierung

N_V : Leistung des Nutzsignals

N_Q : Quantisierungsrauschleistung

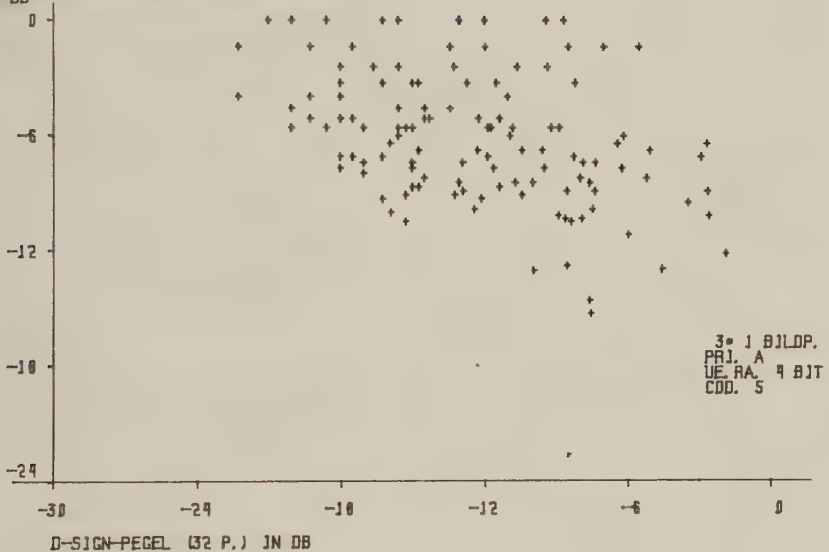
N_Z : zusätzliche Störleistung infolge Mehrfachbelegg.

Wird die Leistung N_Z nicht durch ein weißes Rauschsignal erzeugt, so liefert die Berechnung von V auch keinen echten Störabstand im Sinne der Definition nach [16]. Der mit Störabstands-Änderung bezeichnete Term ergibt jedoch eine brauchbare Vergleichszahl für die Beeinträchtigung der Bildgüte durch eine Störleistung N_Z . Für $N_Z = 0$ ergibt er den Wert 0 dB.

Im Rahmen einer Rechner-Simulation der Bildüberlagerung wurde die Störabstands-Änderung für Zeilenabschnitte von je 32 Bildpunkten bestimmt. Die so erhaltenen Werte wurden in Abhängigkeit vom Effektivwert des Differenzsignals über die 32 Bildpunkte in einem Diagramm dargestellt. Bild 5.6 zeigt ein Beispiel des vom Rechner ausgegebenen Diagramms. Lage und Orientierung der Punktwolke lassen erkennen, daß die Störabstands-Änderung bei hohem Differenzpegel größer ist als bei niedrigem Differenzpegel.

Die beschriebene Simulation wurde für die Konzentrationsverhältnisse 2:1, 3:1 und 4:1 mit 1, 2 und 3 Überlagerungsbildern durchgeführt. Anschließend wurde die Verteilung der Kreuzchen entsprechend Bild 5.6 für 3 dB breite Streifen hinsichtlich des Differenzpegels ausgewertet. Bild 5.7 zeigt den Verlauf des Mittelwertes der Störabstands-Änderung und des Wertes, oberhalb dessen 95 % der Kreuzchen lie-

STÖRABSTANDS-ÄNDERUNG D. UEBERLAG.
IN DB



++ QUELLEN (5 BIT): 1•PL 1•ST. 1•KU.++

Bild 5.6 Örtliche Störabstands-Änderung

Bezugswert des Differenz-Signal-Pegels:
Effektivwert 4 Stufen

gen würden (die Verteilungen für die 3 dB-Streifen wurden vom Rechner anhand sehr großer Stichproben bestimmt).

Die 95 %-Schwelle nähert den "worst case" an und vermittelt einen Eindruck von der Ausdehnung der Punktwolke. Der Abstand zwischen Mittelwert und 95 %-Schwelle beträgt mit wenigen Ausnahmen etwa 5 dB. Für die Diskussion des Verlaufs der Mittelwertkurven wird eine Bereichseinteilung eingeführt, welche für alle 3 Diagramme gelten soll.

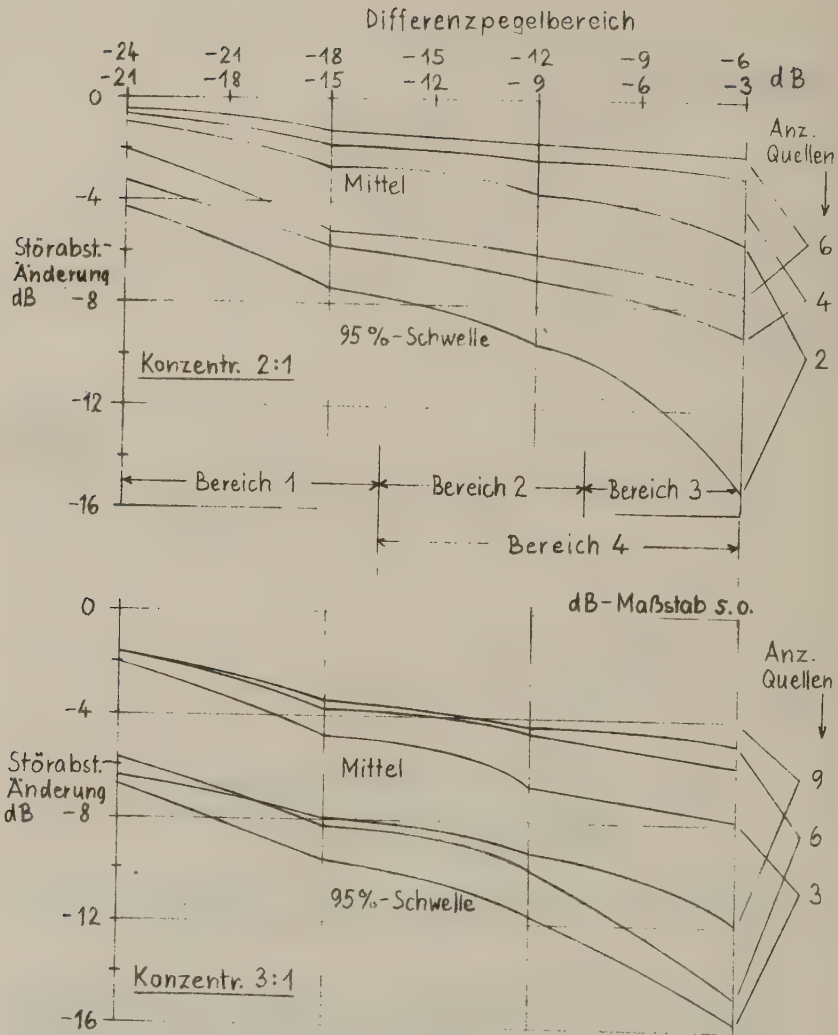


Bild 5.7 Störabstands-Änderung in Abhängigkeit vom Differenzpegel

Bezugsdifferenz: 4 Stufen

Fortsetzung des Bildes auf der nächsten Seite

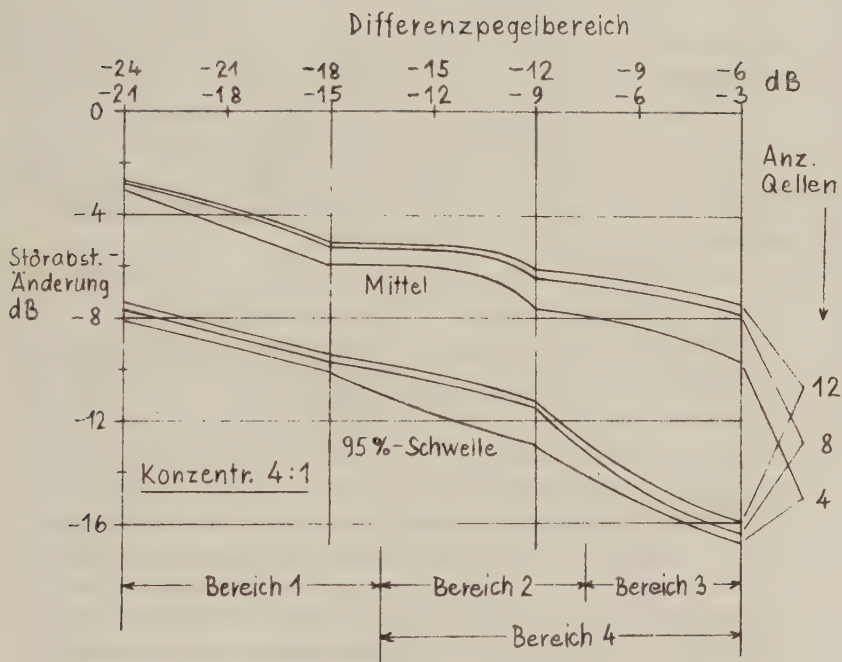


Bild 5.7 Störabstands-Änderung in Abhängigkeit vom Differenzpegel
(Fortsetzung)

Folgende Betrachtung wird vorausgeschickt:

Prinzipiell gilt bei Fehlerwahrscheinlichkeit f :

$$N_Z = f \cdot D_{\text{eff}}^2$$

D_{eff} : Differenz-
effektivwert
pro Teilfeld

und damit

$$\lg \left(1 + \frac{N_Z}{N_Q}\right) = \lg \left(1 + f \cdot \frac{D_{\text{eff}}^2}{N_Q}\right).$$

Wächst also D_{eff}^2 linear, dann wächst $1 + \frac{N_Z}{N_Q}$ etwas schwächer solange noch nicht gilt

$$1 + \frac{N_Z}{N_Q} \approx \frac{N_Z}{N_Q}.$$

Bei fester Fehlerwahrscheinlichkeit wäre also ein leicht unterproportionales Wachstum der Störabstands-Änderung mit zunehmendem Differenzpegel zu erwarten (N_Z / N_Q liegt in der Größenordnung 1,5 ... 3). Tritt dennoch lineares oder überproportionales Wachstum auf, dann nimmt die Fehlerwahrscheinlichkeit zu. Das ist der Fall bei zunehmender Belegungsdichte, da die Fehlerwahrscheinlichkeit dem Produkt der Belegungsdichten von sich paarweise überlagernden Bildern proportional ist. Die Steigung der Kurven ist abhängig vom Anteil der fehleranfälligen Belegungen an allen Belegungen des betreffenden Segments. Sind alle Belegungen gleichermaßen fehleranfällig (z. B. Differenz 1), dann ist die Steigung am größten.

In Bereich 1 werden Bildstellen mit schwacher, leicht zunehmender Belegungsdichte erfaßt, praktisch alle Belegungen dürften fehleranfällig sein, da dem Betrage nach gleich 1.

In Bereich 2 sind nicht mehr alle Belegungen fehleranfällig, d. h. Differenzen größer 1 treten auf. Die Belegungsdichte nimmt leicht zu.

In Bereich 3 sind noch weniger Belegungen als in Bereich 2 fehleranfällig. Hier werden die kontrastreichen Bildstellen mit den größten Differenzen erfaßt. Die Belegungsdichte nimmt kaum noch zu.

Bereich 4 entspricht der Bedingung "Effektivwert der Differenz größer 1", welche der Markierung von Teilfeldern in Bild 3.6 zugrunde liegt. Die ermittelte Besetzung des Bereichs 4 mit 38,2 % aller Bildsegmente steht im Rahmen der Meßgenauigkeit in Übereinstimmung mit dem Anteil markierter Teilfelder von im Mittel 47,6 %.

Man erkennt in allen drei Diagrammen, daß die durch Erhöhung der Quellenzahl erreichbare Reduktion der Störabstandsverminderung zu einem hohen Anteil bereits durch Übergang auf die doppelte Quellenzahl, d. h. von 2 auf 4, von 3 auf 6 bzw. von 4 auf 8 ausgeschöpft wird.

5.3 Abschätzung der Leistungsfähigkeit des MPZ-Verfahrens auf der Grundlage der statistischen Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird ein Diagramm abgeleitet, welches die Anzahl übertragbarer Quellen pro Kanal durch das MPZ-Verfahren bei gegebener Fehlerleistung bzw. Störabstandsänderung wiedergibt. Im zweiten Teil wird der für die Adressierung notwendige zusätzliche Codierungsaufwand berechnet.

Das Diagramm für die übertragbare Quellenzahl ist in Bild 5.8 dargestellt. Da beim MPZ-Verfahren pro Kanal 1 Überlagerungsbild übertragen wird, entspricht die Anzahl der Kanäle derjenigen der Überlagerungsbilder in der statistischen Untersuchung. Die ausgezogene Kurvenschar wird durch Umrechnung aus Bild 5.4 gewonnen und trägt doppelte Parameterangaben. Die

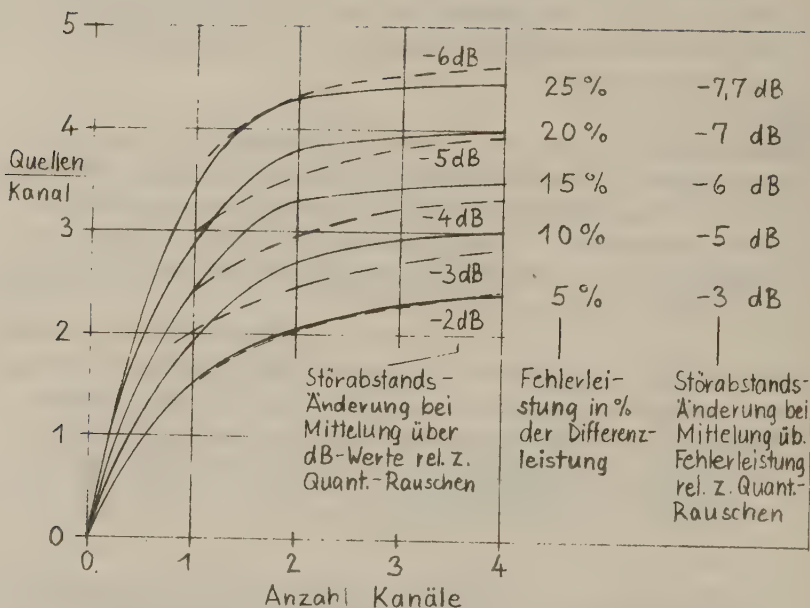


Bild 5.8 Übertragbare Anzahl Quellen pro Kanal
beim MPZ-Verfahren

Prozentangaben bringen die Fehlerleistung in Relation zur Differenzleistung der Bildvorlage. Die dB-Angaben basieren auf einer Umrechnung der Mittelwertskurven von Bild 5.7 und bringen die Fehlerleistung in Relation zur Leistung des Quantisierungsrauschens. Sie sind als Störabstands-Änderung ausgerechnet und stellen die Parameter einer deckungsgleichen Kurvenschar dar. Wesentlich ist dabei, daß die Mittelwertbildung nicht mit den logarithmischen Störabstands-Änderungswerten, sondern mit den Fehlerleistungen durchgeführt wird. Verwendet man die logarithmischen Werte, so ergibt sich die gestrichelte Kurvenschar.

Der Unterschied der Kurvenscharen liegt in der logarithmischen Leistungsskala begründet, welche bei großen Werten - in diesem Fall großen örtlichen Fehlerleistungen - komprimiert ist. Dies wird besonders deutlich, wenn man die Kurvenscharen hinsichtlich des in Bild 5.3 dargestellten Abbaus der Fehlerhäufigkeiten beim Übergang von 1 Kanal auf 2 bzw. 3 Kanäle betrachtet. Der starke Rückgang besonders der großen Fehler beim Übergang von 1 auf 2 Kanäle ist an der ausgezogenen Kurvenschar deutlicher erkennbar als an der gestrichelten Kurvenschar.

In Ergänzung zu Bild 5.8 zeigt Bild 5.9 den Verlauf der Fehlerleistung relativ zur Differenzleistung bei festem Konzentrationsverhältnis.

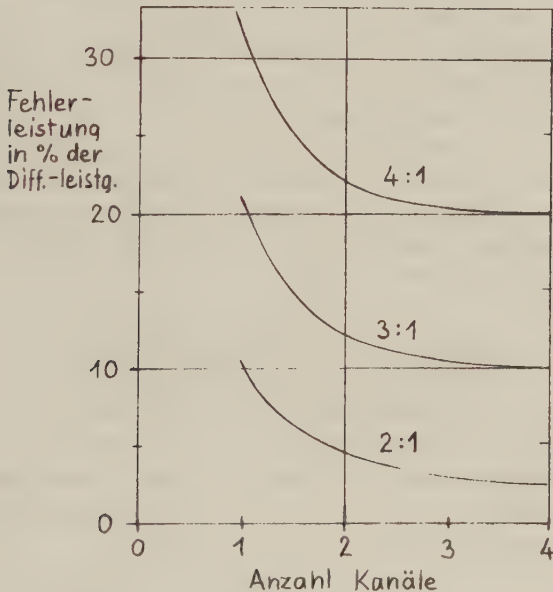


Bild 5.9 Fehlerleistung relativ zur Differenzleistung
Parameter: Konzentrationsverhältnis

Die wichtigste Aussage der Bilder 5.8/5.9 besteht darin, daß bei festgehaltenem Fehlerprozentsatz von den möglichen Leistungssteigerungen des MPZ-Verfahrens zwischen 63 % und 82 % bereits beim Übergang von 1 Kanal auf 2 Kanäle erreicht werden. Dieser Anteil entspricht einer Leistungssteigerung von im Mittel 33 %. Bei festgehaltenem Konzentrationsverhältnis wird durch den Übergang von einem auf zwei Kanäle eine Reduzierung der Fehlerleistung zwischen 31 % und 57 % erreicht.

Im folgenden wird gezeigt, daß die Leistungssteigerung durch Kanalzahl-Erhöhung durch zusätzlichen Adressierungsaufwand kaum vermindert wird, wenn man die Adreßcodierung günstig gestaltet.

Beim MPZ-Verfahren mit 1 Kanal wird jeder gesendete Differenzwert mit der Nummer der Quelle versehen. Dabei hat es sich in experimentellen Untersuchungen [21] herausgestellt, daß man die für den unbenutzten Kanal laut [12] vorzusehende "Adresse" für eine weitere Quelle verwenden kann, wenn man im Falle keiner Übertragungsanforderung für eine Quelle eine "parasitäre" Differenz 1 überträgt. Die Bildgüte wird dadurch kaum merklich beeinträchtigt, doch die Ausnutzung des Adreßcode steigt um 33 %, wenn man statt 3 Quellen 4 Quellen adressieren kann.

Für die Übertragung von n Quellen über 2 Kanäle wird vorgeschlagen, die Differenzwerte nicht direkt mit den Quellenadressen zu versehen, sondern beide Adressen zu einem Rahmenbesetzungswort zusammenzufassen. Der Inhalt dieses Rahmenbesetzungswortes wird über eine Tabelle den möglichen Quellenkombinationen zugewiesen, was eine gute Codeausnutzung erlaubt (vgl. Bild 5.10, $n = 4$).

Im Beispiel von Bild 5.10 sind noch 2 Inhalte des Rahmenbesetzungswortes frei. Trotzdem werden nur 3 bit insgesamt benötigt gegenüber 4 bei direkter Adreßzuordnung zum Diffe-

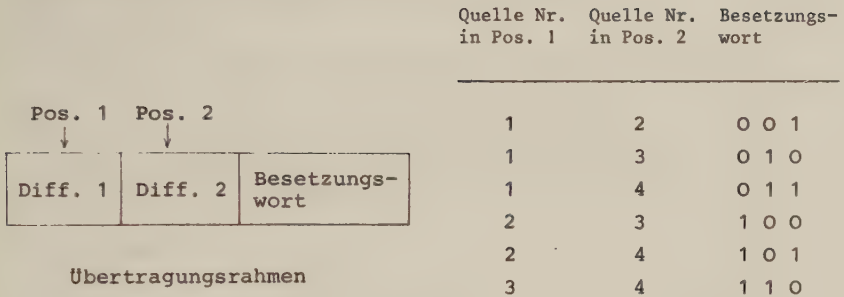


Bild 5.10 Übertragungsrahmen und Besetzungstabelle

renzwert. Sollte sich nach diesem Schema eine Anzahl von Quellenkombinationen ergeben, welche eine volle Zweierpotenz knapp überschreitet, so daß der duale Adreßcode schlecht ausgenutzt wäre, so kann durch Streichung gewisser Quellenkombinationen das schlecht ausgenutzte Adreßbit wieder eingespart werden. Die Fehlerleistung in den betreffenden Bildern steigt dabei allerdings. Die folgende Tabelle vermittelt einen Überblick über den Adressierungsaufwand bei verschiedenen Konzentrationsverhältnissen sowie zum Vergleich die Fehlerleistungs-Prozentsätze für MPZ-Systeme mit 1 bzw. 2 Kanälen. Dabei ist für Kanal-Leerlauf kein Codewort berücksichtigt.

Quellen-Kanal-Verhält.	Anzahl mögl. Komb.	Länge Bes-Wort (bit)	freie Komb.(+) gestr.Komb.(-)	Adreßcode bit/Quelle u. Bildp.	Fehlerleistung in % der Diff.-Leistung (bei gestr. Kombin. in d. betr. Bildern)
2:1	2	1	0	0,5	10,5
3:1	3	2	+ 1	0,67	21
4:1	4	2	0	0,5	32
3:2	3	2	+ 1	0,67	2
4:2	6	3	+ 2	0,75	4,5
5:2	10	3	- 2	0,6	13,3
5:2	10	4	+ 6	0,8	8,5
6:2	15	4	+ 1	0,67	12,5
7:2	21	4	- 5	0,57	20,3
7:2	21	5	+11	0,71	17
8:2	28	5	+ 4	0,63	22

Die Auswertung der Tabelle ergibt:

- 1) Die durch gestrichene Besetzungsm glichkeiten implizierte zusätzliche Fehlerleistung kann die Hinzunahme einer weiteren Quelle und Codierung aller Besetzungen rechtfertigen.

Beispiel Quellen-Kanal-Verhältnis 5:2, 6:2 :

Übergang von 5:2 mit 3 bit-Besetzungswort auf 6:2 mit 4 bit-Besetzungswort ergibt

- 6 % weniger Fehlerleistung
- 12 % mehr Adressieraufwand
- 20 % mehr Übertragungsleistung.

- 2) Die Verdoppelung des Systems 3:1 auf 6:2 erfordert keinen zusätzlichen Adressieraufwand bei Reduzierung der Fehlerleistung um 40 %.

Zusammenfassend ist festzustellen:

Die vorgelegten Untersuchungen geben einen Überblick über die Leistungsfähigkeit des MPZ-Verfahrens für Bilder mit Prioritätszuteilung zum größten Differenzbetrag. Sie geben Aufschluß über die zu erwartenden Verbesserungen beim Übergang auf mehr als einen Kanal bei entsprechender Erhöhung der Quellenzahl.

Die experimentelle Untersuchung der behandelten Quellen-Kanal-Verhältnisse, insbesondere mit 3 und 4 Kanälen hätte einen erheblichen Aufwand an Material und Entwicklungsarbeit gekostet, welcher durch die Ergebnisse nicht gerechtfertigt worden wäre. Auf die Realisierung des Verfahrens mit 4 Quellen und 1 Kanal wird in diesem Zusammenhang verwiesen [21]. Von dort stammt das im folgenden wiedergegebene Monitorfoto eines Bildes mit Fehlern aus der Überlagerung von 4 Quellen.



Bild 5.11 Bildvorlage mit Überlagerungsfehlern [21]
(linke Seite PCM ungestört, rechte Seite
DPCM nichtlin., MPZ-Verfahren)

6 Zusammenfassung und Schlußbemerkung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Überlagerungsprinzip mit momentaner Prioritätszuteilung zur wirtschaftlichen Quellencodierung von Bildern theoretisch untersucht¹⁾. Dafür wird eine Vorrichtung zur Eingabe von Bildern in einen Prozeßrechner aufgebaut, welche mit einer Fernsehkamera arbeitet. Durch gezielte statistische Untersuchungen eines Satzes von Bildvorlagen wird gezeigt, in welchen Punkten das Signal der Bildquelle von einer Markowkette 1. Ordnung abweicht. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wird ein mathematisches Modell für das Überlagerungsverfahren entwickelt, welches die Berechnung der Verteilung der durch die Bildüberlagerung hervorgerufenen Bildpunktfehler erlaubt. Durch Rechnung nach dem Modell sowie Simulation des Überlagerungsverfahrens für Bildausschnitte wird ermittelt, wieviele Quellen bei gegebener Fehlerleistung im Mittel pro Überlagerungsbild codiert werden können. Dies schließt die Untersuchung des Effekts des statistischen Ausgleichs von Aktivitätsspitzen bei Zusammenfassung größerer Quellenzahlen zu mehreren Überlagerungsbildern ein.

Das unter verschiedenen Aspekten der Untersuchung (Ausnutzung des Überlagerungsbildes, Verminderung der Fehlerleistung, Steigerung des Verhältnisses der Quellenzahl zur Anzahl der benötigten Überlagerungsbilder) übereinstimmend gefundene Ergebnis besagt, daß eine deutliche Steigerung der Effektivität des Überlagerungsverfahrens durch den Übergang von einem auf zwei Überlagerungsbilder und ent-

1) Das untersuchte Prinzip der Bildüberlagerung entspricht dem an anderer Stelle vorgeschlagenen MPZ-Verfahren [12].

sprechend mehr Quellen erreicht wird, und daß darüber hinaus nur noch geringfügige Verbesserungen möglich sind.

Der Verfasser dankt Herrn Professor Dr.-Ing. D. Seitzer für die Anregung zu der vorliegenden Arbeit sowie für deren Förderung durch stetes Interesse und konstruktive Kritik.

7 Literatur

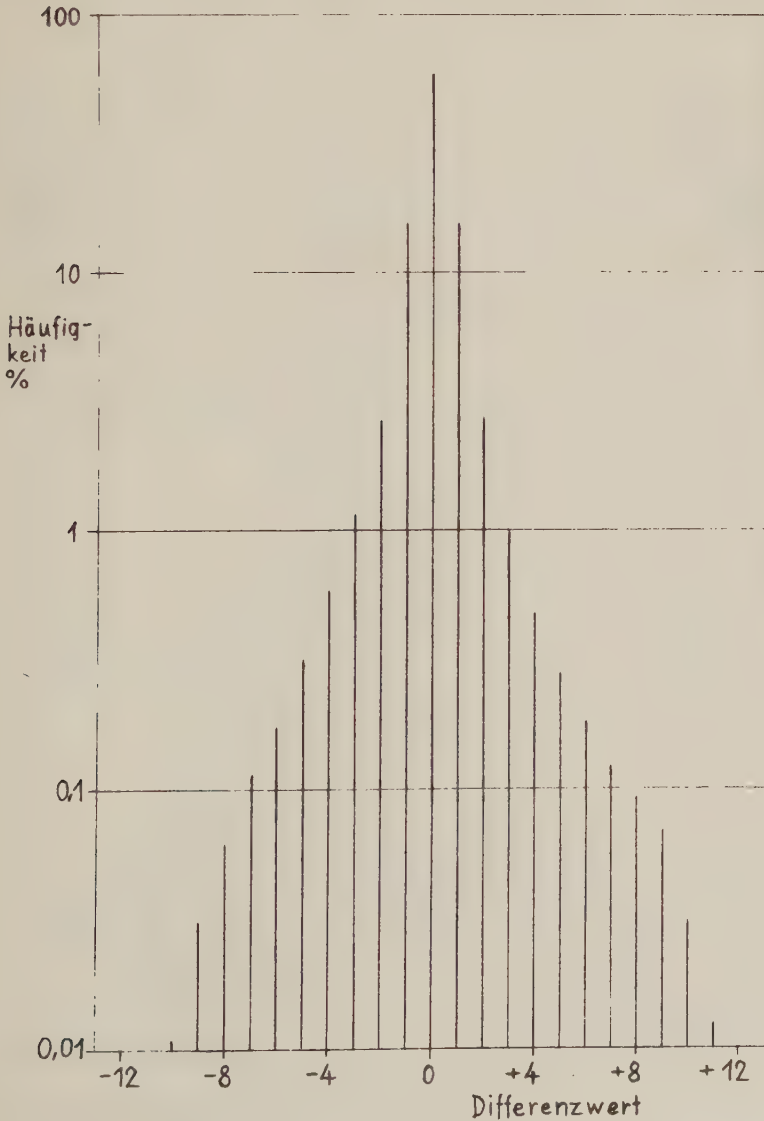
- [1] Shannon, C. E.: A Mathematical Theory of Communication.
Bell Syst. Techn. J. 27 (1948), S. 379-423 u. 623-656
- [2] Shouten, J. F.: Nachricht und Signal
Nachrichtentechnische Fachberichte, Bd.6 (1957), S.II,1-II,2
- [3] Clinch, C. E. E.: Time Assignment Speech Interpolation
(T.A.S.I.)
The Post Office Electrical Engineer Journal 53 (1960),
Pt. I, S. 197-200
- [4] Weitowitz, R.: Ein redundanzminderndes Sprachmultiplex-
verfahren mit momentaner Prioritätszuteilung
Proc. Internat. Zürich Seminar on Digital Communications,
1974, S. A3, 1-6
- [5] Gerhäuser, H./Seitzer, D./Weitowitz, R.: Zeitmultiplex-
verfahren mit prädiktionsgesteuerter Wortaufteilung
Nachrichtentechnische Z. 28 (1975) 1, S. 25-27
- [6] Acs, E./Hutter, O.: Eine 30-Kanal-Multiplexeinrichtung
nach dem lagemodulierten Adressen-Kode-System
Nachrichtentechnik 17 (1967) 2, S. 55-58
- [7] Huang, T. S./Tretiak, O. J.: A Pseudorandom Multiplex
System for Facsimile Transmission
IEEE Trans. on Comm. Techn. 16 (1968) 3, S. 436-438
- [8] Closs, F. H./Seitzer, D./Stucki, P.: Multiplexverfahren
zur Übertragung von Bildern
Schweizerische Patentschrift Nr. 476 392, angemeldet am
12. 7. 1968
- [9] Seitzer, D./Closs, F./Stucki, P.: An Experimental Approach
to Video Bandwidth Compression by Multiplexing
IEEE Trans. on Comm. Techn. 17 (1969) 5, S. 564-568

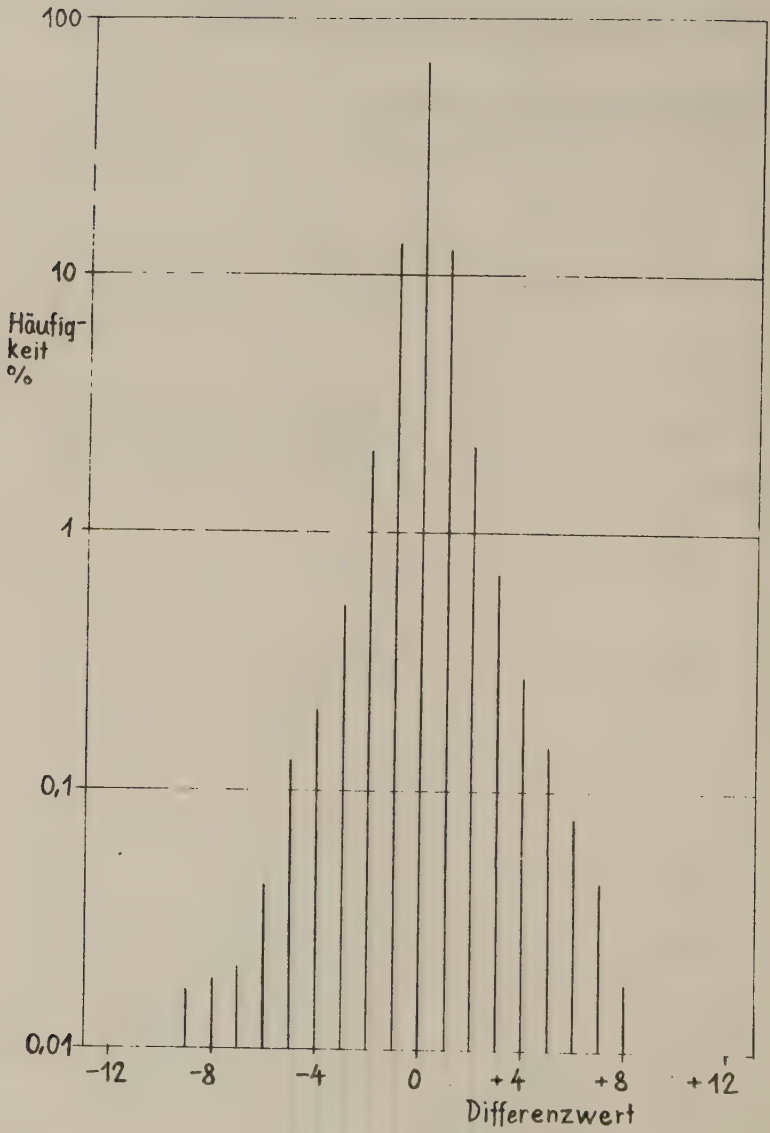
- [10] Stucki, P.: Adressencodierte synchrone Multiplexverfahren zur wirksamen Übertragung digitaler Bildsignale
Dissertation Nr. 4516, ETH Zürich, 1970
Veröffentlichung:
Stucki, P.: Limits of Instantaneous Priority Multiplexing Applied to Black-and-White Pictures
IEEE Trans. on Comm. Techn. 19 (1971) 2, S. 169-177
- [11] Seitzer, D.: Instantaneous Priority Multiplexing of Gray Pictures
IEEE Trans. on Comm. Techn. 18 (1970), S. 690-692
- [12] Seitzer, D.: Ein experimentelles Multiplex-Verfahren zur Redundanzverminderung bei der Bildübertragung
Nachr.-techn. Fachber., Bd. 40 (1971), S. 34-45
- [13] Kummerow, Th.: Ein DPCM-System mit zweidimensionalem Prädiktor und gesteuertem Quantisierer
NTG-Tagung "Signalverarbeitung", 4.-6. April 1973, Erlangen, Sammelband der Vortragsskripten, S. 425-439
- [14] Wintz, P. A.: Transform Picture Coding
Proc. IEEE 60 (1972) 7, S. 809-820
- [15] Störmer, H. u.a.: Verkehrstheorie
R. Oldenbourg-Verlag, München und Wien, 1966
- [16] Bödeker, H./Haberkant, E./Schütte, O.: Der HF-Störabstand des Rauschens beim Fernsehempfang
Intern. Elektron. Rundschau 17 (1963) 8, S. 409-410
- [17] Händle, J.: Mündl. Information über Laborversuche mit Vidikonröhren im Hause Siemens AG, Erlangen
- [18] Störmer, H. (Hrsg.): Praktische Anleitung zu statistischen Prüfungen
R. Oldenbourg-Verlag, München und Wien, 1971

- [19] Takačz: Stochastische Prozesse
R. Oldenbourg-Verlag, München und Wien, 1966
- [20] Testbildersatz, verteilt durch den Lehrstuhl für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung
(Prof. Dr.-Ing. H. G. Musmann) der TU Hannover
- [21] Tietze, U.: Untersuchung eines datenreduzierenden Multiplex-Verfahrens für die digitale Bildübertragung
Dissertation am Fachbereich Ingenieurwissenschaften der Universität Erlangen-Nürnberg, 1975
- [22] Pearson, D. E.: Techniques for Scaling Television Picture Quality: A Survey
Picture Bandwidth Compression, Huang, T. S./Tretiak, O. J. (Hrsg.), Gordon and Breach, Science Publishers, New York, London, Paris, 1972

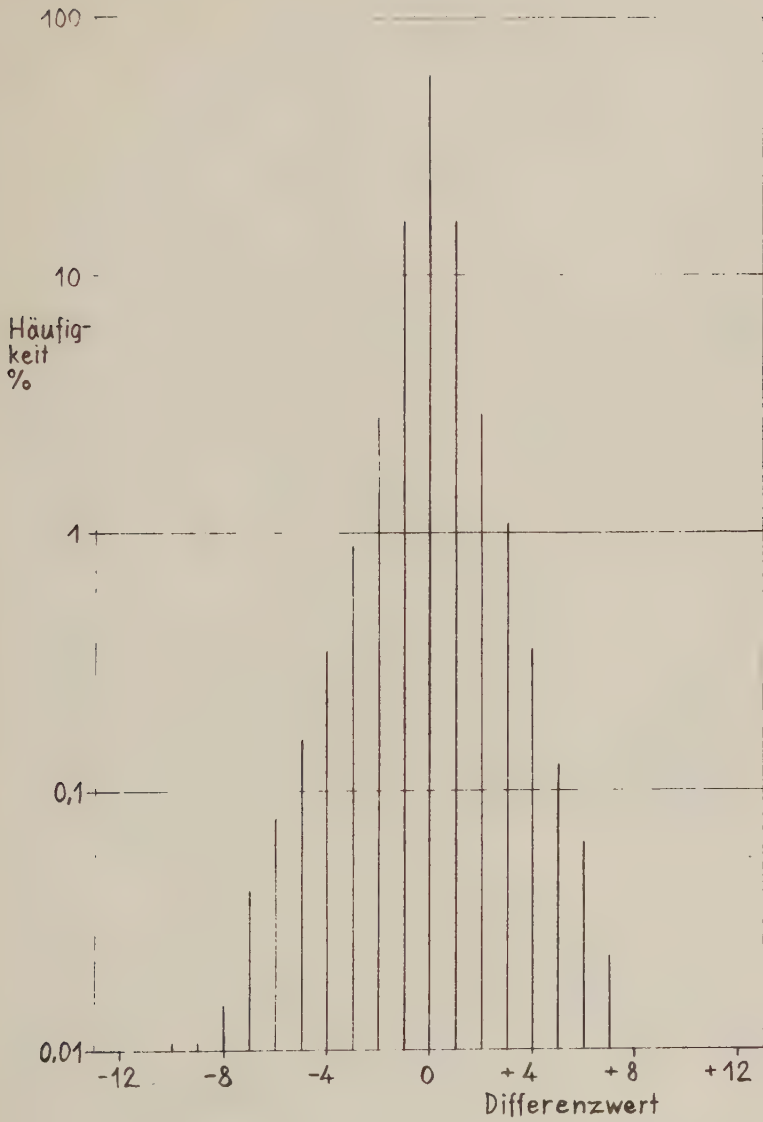
Anhang: Differenzverteilungen der Quellbilder

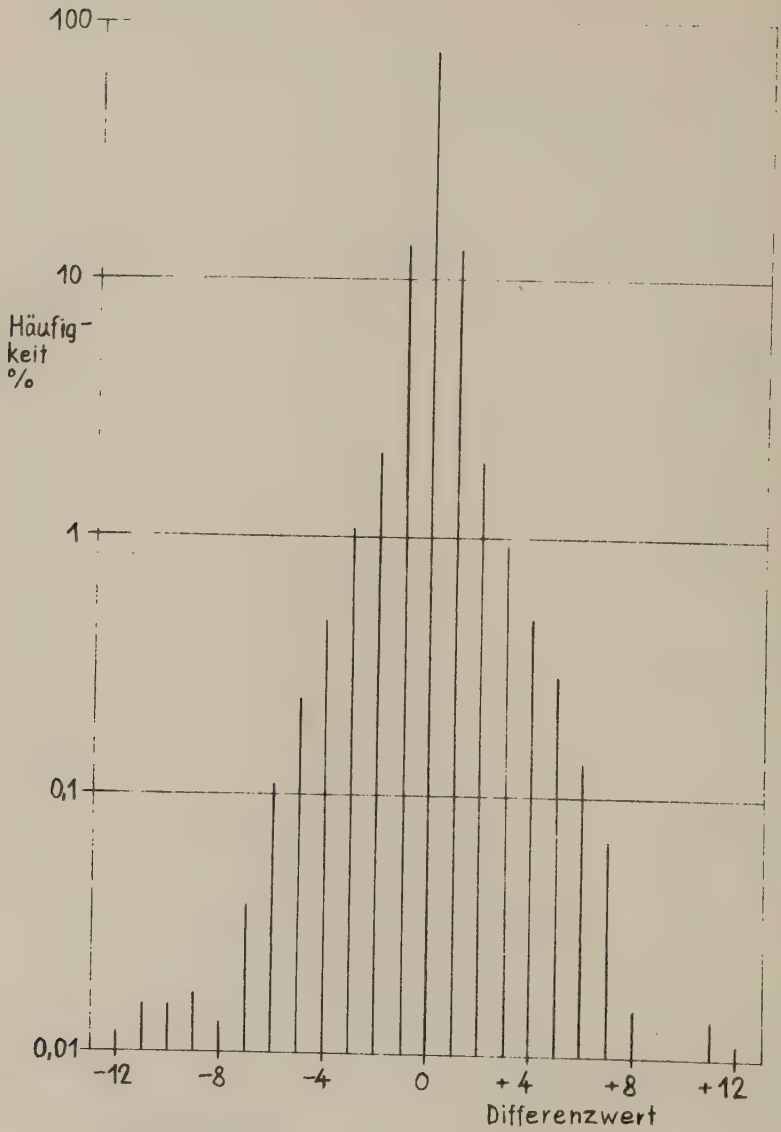
Quantisierung: 32 Amplitudenstufen





Vorlage Strohhutdame





Vorlage Dürerhaus

L e b e n s l a u f

Am 9. 6. 1939 wurde ich in Allenstein/Ostpreußen als Sohn des Dipl.-Ing. Architekt Werner Oehme und seiner Ehefrau Else Oehme, geb. Hirrle, geboren. Ich besuchte die Grundschule von 1945 - 1953 in Zschopau/Sachsen bzw. Chemnitz und anschließend von 1953 - 1957 die Oberschule in Chemnitz, später Karl-Marx-Stadt, mit dem Abschluß der Reifeprüfung. Danach machte ich eine Lehre als Büromaschinenmechaniker. Von 1959 - 1964 studierte ich an der TH Stuttgart Elektrische Nachrichtentechnik mit dem Abschluß Diplom. Von 1964 - 1968 war ich als Entwicklungsingenieur im Zentral-Laboratorium für Nachrichtentechnik, Labor für Verkehrstheorie, der Siemens AG in München tätig. Seit 1968 arbeite ich als wissenschaftlicher Assistent, zunächst am Institut für Mathematische Maschinen und Datenverarbeitung, und ab 1970 am Institut für Elektrotechnik, Lehrstuhl für Technische Elektronik der Universität Erlangen-Nürnberg, wo die vorliegende Arbeit entstand.

Erlangen, Oktober 1975

Friedrich Oehme

Copie - Centet 2000

852 ERLANGEN • Obere Karlstr. 30